

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

# **Modelování bezdrátového přenosového kanálu pomocí softwarově definovaného rádia**

## **Wireless Channel Modeling Using Software Defined Radio**

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Václav Durčák**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Modelování bezdrátového přenosového kanálu pomocí softwarově  
definovaného rádia  
Wireless Channel Modeling Using Software Defined Radio

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zaměřuje na klasifikaci, popis, simulaci a hodnocení metod pro modelování moderního bezdrátového přenosového kanálu. Cílem absolventské práce je návrh, realizace a ověření funkčnosti virtuálního generátoru-analizátoru digitálně modulovaných signálů (M-QAM, M-PSK, QFDM, apod.), který bude umožňovat modelování nejčastěji vyskytujících se rušení v reálném bezdrátovém přenosovém kanále. Systém bude navržen pomocí vývojového prostředí LabVIEW na bázi softwarově definovaného rádia. Navržený systém bude vhodný pro testování nových i stávajících metod ekvalizace v moderních bezdrátových digitálních komunikačních systémech.

Postup řešení

1. Literární rešerše současného stavu problematiky modelování moderních bezdrátových přenosových kanálů.
2. Matematický popis vybraných modelů (např.: Fading and Multipath Models – Rayleigh, Rician, Nakagami-m, Weibull, Tapped delay model; Path Loss Model – Log-distance Path Loss Mod, Okumura-Hata Model, COST 231-Walfish-Ikegami Model; Noise Model; Digital Error Models, apod.).
3. Analýza vlastností reálného bezdrátového přenosového kanálu pomocí vektor signálového generátoru (VSG) a vektor signálového analyzátoru (VSA).
4. Návrh virtuálního generátoru-analizátoru digitálně modulovaných signálů včetně implementace vybraných známých či vlastních modelů bezdrátového přenosového kanálu, které budou stanoveny na základě bodů 1-3.
5. Reálná implementace vybraných metod do systému softwarově definovaného rádia SDR, realizovaného na bázi USRP nebo PXI v laboratorních podmínkách.
6. Porovnání vlastností vybraných implementovaných modelů.
7. Diskuze dosažených výsledků (možnosti využití navržené koncepce pro testování nových i stávajících metod ekvalizace v laboratorních podmínkách).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Žalud, Václav, and Josef Dobeš. "Moderní radiotechnika." BEN-technická literatura 768 (2006).
- [2] Simon, Marvin K., and Mohamed-Slim Alouini. Digital communication over fading channels. Vol. 95. John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Salous, Sana. Radio propagation measurement and channel modelling. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] Fontán, Fernando Pérez, and Perfecto Mariño Espiñeira. Modelling the wireless propagation channel: a simulation approach with Matlab. Vol. 5. John Wiley & Sons, 2008.

- [5] Ghassemlooy, Zabih, Wasiu Popoola, and Sujan Rajbhandari. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. CRC Press, 2012.
- [6] Heath Jr, Robert W. "Digital Wireless Communication: Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP." (2012).
- [7] Kučera, Jan. Modelování přenosových kanálů pro příjem digitální televize DVB-T/H. Diss. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- [8] Daďa, Petr. Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T v prostředí MATLAB. Diss. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [9] Hloušek, Tomáš. Rušení v bezdrátových sítích a jejich modelování (AWGN, Rayleigh, Rice fading channels). Diss. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Martinek, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Tomis

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 28. dubna 2017

.....  




Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 28. dubna 2017

.....  


Rád bych na tomto místě poděkoval panu doc. Ing. Radku Martinkovi, Ph.D za rady a odbornou pomoc při tvorbě této diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat za odborné konzultace Ing. Petru Koudelkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Tomisovi.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zaměřuje na klasifikaci, popis, simulaci a hodnocení metod pro modelování moderního bezdrátového přenosového kanálu. Práce zahrnuje odborný popis kanálových modelů včetně jejich aplikace v programu v LabVIEW. Kanálové modelování probíhalo na základě získaných dat z reálného měření, kde probíhala komunikace viditelným světlem (VLC). Reálné měření se uskutečnilo v laboratorních podmínkách, kde mezi vysílačem a přijímačem byly simulovány různé meteorologické podmínky (např. mlha, déšť, tepelné turbulence).

**Klíčová slova:** kanálové modelování, simulace, LabVIEW, komunikace viditelným světlem, VLC.

## **Abstract**

The thesis focuses on the classification, description, simulation, and evaluation methods for modeling modern wireless transmission channel. Work includes technical description of channel models and their application in LabVIEW. Channel modeling was based on data obtained from real measurements, which took place visible light communication (VLC). Real measurements were made in laboratory conditions and between the transmitter and the receiver were simulated various meteorological conditions (eg. fog, rain, heat turbulence)

**Key Words:** channel modeling, simulation, LabVIEW, Visible Light Communication, VLC

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>10</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>14</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>15</b>
<b>2 Šíření signálu volným prostředím</b>	<b>16</b>
2.1 Odraz . . . . .	16
2.2 Lom . . . . .	16
2.3 Ohyb . . . . .	17
2.4 Rozptyl (Scattering) . . . . .	17
2.5 Vícecestné šíření signálu . . . . .	18
2.6 Ztráty šířením . . . . .	19
2.7 Atmosférické vlivy . . . . .	19
2.8 Dopplerův jev . . . . .	19
2.9 Pomalé úniky (Slow fading) . . . . .	19
2.10 Zastínění (Shadowing) . . . . .	19
2.11 Rychlé úniky (Fast fading) . . . . .	20
2.12 Útlum volného prostoru (FSPL) . . . . .	20
<b>3 Měření přenosového kanálu</b>	<b>22</b>
3.1 Parametry přenosového kanálu . . . . .	22
3.2 Šířka pásma . . . . .	25
3.3 Přenosová a modulační rychlost . . . . .	25
3.4 Digitální modulace . . . . .	26
3.5 Konstelační diagram . . . . .	28
3.6 Diagram oka . . . . .	29
<b>4 Radiokomunikační řetězec</b>	<b>32</b>
4.1 Komunikační kanál . . . . .	33
4.2 Modelování kanálu . . . . .	33
<b>5 Modely komunikačního kanálu</b>	<b>34</b>
5.1 Únikové a vícecestné modely (Fading and Multipath Models) . . . . .	34
5.2 Path Loss modely . . . . .	38
5.3 Šumové modely . . . . .	39

<b>6</b>	<b>Komunikace viditelným světlem</b>	<b>41</b>
6.1	Architektura a princip činnosti VLC . . . . .	41
6.2	Aplikace VLC . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Návrh měřicí soustavy</b>	<b>44</b>
7.1	Použité nástroje a komponenty v měřicí soustavě . . . . .	44
7.2	Realizace přenosového kanálu . . . . .	54
<b>8</b>	<b>Měření na vnitřním stropním světle</b>	<b>55</b>
8.1	Schéma zapojení se stropním světlem . . . . .	55
8.2	Nastavení měřicího systému pro stropní světlo . . . . .	56
8.3	Zpracování a analýza výsledků . . . . .	57
<b>9</b>	<b>Měření na zadním brzdovém světle automobilu</b>	<b>64</b>
9.1	Schéma zapojení se zadním brzdovým světlem automobilu . . . . .	64
9.2	Nastavení měřicího systému pro zadní brzdové světlo automobilu . . . . .	65
9.3	Prázdný box . . . . .	67
9.4	Tepelné turbulence . . . . .	71
9.5	Děšť 42 l/min . . . . .	75
9.6	Děšť 22 l/min . . . . .	80
9.7	Mlha . . . . .	85
<b>10</b>	<b>Simulování bezdrátového přenosového kanálu</b>	<b>91</b>
10.1	Aplikace pro simulování bezdrátového kanálu . . . . .	91
10.2	Simulace bezdrátového přenosového kanálu . . . . .	95
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>104</b>
	<b>Literatura</b>	<b>105</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>107</b>
<b>A</b>	<b>Grafy naměřených hodnot - měření na vnitřním stropním světle</b>	<b>108</b>
<b>B</b>	<b>Tabulky naměřených hodnot - měření na vnitřním stropním světle - šířka pásma 1 MHz</b>	<b>110</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

ASK	– Amplitudové klíčování (Amplitude Shift Keying)
BER	– Bitová chybovost (Bit Error Rate)
BS	– Základnová stanice (Base Station)
CAN	– Controller Area Network
CCT	– Correlated Color Temperature
CRI	– Color Rendering Index
EVM	– Error Vector Magnitude
FEC	– Forward error correction
FSK	– (Frekvenční klíčování) Frequency Shift Keying
FSPL	– Útlum volného prostoru (Free-space path loss)
Li-Fi	– Light Fidelity
LOS	– Přímá optická viditelnost (Line of Sight)
MER	– Modulation error ratio
MS	– Mobilní stanice (Mobile Station)
NLOS	– Nepřímá optická viditelnost (Non Line of Sight)
PLL	– Phase-locked loop
PSK	– Phase Shift Keying
QAM	– Kvadrurní amplitudová modulace (Quadrature Amplitude Modulation)
QE	– Quadrature Error
SNR	– Poměr signál-šum (Signal-to-noise ratio)
TDL	– Tapped Delay Line
RMS	– Root mean square
USRP	– Universal Software Radio Peripheral
VLC	– Komunikace viditelným světlem (Visible light communication)
Wi-Fi	– Wireless Fidelity

## Seznam obrázků

1	Odraz (reflexe).	16
2	Lom.	17
3	Ohyb.	17
4	Rozptyl.	18
5	Vícecestné šíření signálu.	18
6	Dopplerův jev.	19
7	Zastínění (shadowing). [16]	20
8	Útlum volného prostoru.	21
9	Grafické znázornění chybového vektoru.	24
10	Kvadrurní zkosení.	24
11	Grafické znázornění šířky pásma.	25
12	Modulace ASK, FSK a PSK.	27
13	Konstelační diagram kvadrurní amplitudové modulace (16-QAM).	28
14	Orientace v konstelačním diagramu.	29
15	Překrývání bitových sekvencí pro vytvoření diagramu oka.	29
16	Klíčové parametry diagramu oka.	30
17	Závislost BER na SNR.	31
18	Rádiokomunikační řetězec.	32
19	Kanálové modely.	33
20	Rozdělení: Rayleigh a Rician.	34
21	Rayleigh PDF s různými měřítky.	35
22	Pravděpodobnostní funkce (pdf) Rician distribuce s různými tvary (shape).	36
23	Tapped Delay schéma.	37
24	Fázový šum volně běžícího oscilátoru.	39
25	Fázový šum.	40
26	Viditelné spektrum.	41
27	Architektura VLC.	42
28	Aplikace systému VLC v dopravě.	42
29	Obecné schéma měřicí soustavy.	44
30	Stropní světlo Fortimo LED DLM 3000 44W/840 Gen3.	46
31	Zadní světlo ŠKODA Octavia III.	46
32	Ukázka čelního panelu aplikace pro reálné měření.	47
33	Ukázka části zdrojového kódu.	50
34	Zesilovač zapojený v měřicí soustavě.	51
35	Plankonvexní čočka aplikovaná na fotodetektoru.	52
36	Bias-Tee ZX85-12G.	53
37	Zařízení USRP.	53

38	Návrh měření se stropním světlem. . . . .	55
39	Schéma zapojení se stropním světlem. . . . .	56
40	Frekvenční útlumová charakteristika komunikačního řetězce se stropním světlem. . . . .	57
41	Závislost teoretické přenosové rychlosti na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s různými šířkami pásma. . . . .	58
42	Konstelační diagramy 4-QAM u stropního světla při šířce pásma 1 a 4 MHz a různých vzdálenost - a) 4-QAM, BW = 1 MHz, vzdálenost 0 cm; b) 4-QAM, BW = 1 MHz, vzdálenost 200 cm; c) 4-QAM, BW = 4 MHz, vzdálenost 0 cm; b) 4-QAM, BW = 4 MHz, vzdálenost 200 cm . . . . .	59
43	Závislost bitové chybovosti na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s různými šířkami pásma. . . . .	61
44	Závislost $E_b/N_0$ na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz. . . . .	62
45	Závislost EVM na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz. . . . .	63
46	Schéma zapojení se zadním brzdovým světlem automobilu. . . . .	64
47	Porovnání frekvenčních útlumových charakteristik komunikačního řetězce se zadním brzdovým světlem v různých meteorologických podmínkách. . . . .	66
48	Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro prázdný box. . . . .	67
49	Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - prázdný box. . . . .	67
50	Konstelační diagramy u prázdného boxu a šířce pásma 1 MHz - a) 256-QAM, b) 512-QAM, c) 1024-QAM, d) 2048-QAM. . . . .	68
51	Parametr $E_b/N_0$ jednotlivých M-QAM modulací u různých šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm - prázdný box. . . . .	69
52	Parametr EVM jednotlivých M-QAM modulací u různých šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm - prázdný box. . . . .	70
53	Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro tepelné turbulence. . . . .	71
54	Konstelační diagramy 32-QAM u tepelných turbulencí a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz. . . . .	72
55	Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - tepelné turbulence. . . . .	72
56	Porovnání parametru $E_b/N_0$ jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u tepelných turbulencí a prázdného boxu. . . . .	73
57	Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u tepelných turbulencí a prázdného boxu. . . . .	74
58	Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro dešť (42 l/min). . . . .	75
59	Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - dešť 42 l/min. . . . .	76
60	Konstelační diagramy 32-QAM u deště 42 l/min a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz. . . . .	76



61	Porovnání parametru $E_b/N_0$ jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 42 l/min a prázdného boxu. . . . .	77
62	Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 42 l/min a prázdného boxu. . . . .	78
63	Frekvenční útlumové charakteristiky pro déšť 42 l/min. . . . .	79
64	Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro déšť (22 l/min). . . .	80
65	Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - déšť 22 l/min. . . . .	81
66	Konstelační diagramy 32-QAM u deště 22 l/min a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz. . . . .	81
67	Porovnání parametru $E_b/N_0$ jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 22 l/min a prázdného boxu. . . . .	82
68	Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 22 l/min a prázdného boxu. . . . .	83
69	Frekvenční útlumové charakteristiky pro déšť 22 l/min. . . . .	84
70	Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro mlhu. . . . .	85
71	Naměřené bitové chybovosti daných modulací při šířce pásma 1 - 4 MHz a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy. . . . .	86
72	Graf rozpadu mlhy s vyznačenými optickými výkony laseru a hodnotou BER pro šířku pásma 1 MHz. . . . .	87
73	Graf minimálních hodnot parametru $E_b/N_0$ pro fungování jednotlivých M-QAM modulací na dané šířce pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy. . . . .	88
74	Graf minimálních hodnot parametru EVM pro fungování jednotlivých M-QAM modulací na dané šířce pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy. . . . .	89
75	Frekvenční útlumová charakteristika při rozpadu mlhy. . . . .	90
76	Ukázka čelního panelu aplikace pro simulování bezdrátového přenosového kanálu. .	91
77	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru $E_b/N_0$ při šířce pásma 1 MHz u stropního světla. . . . .	96
78	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru BER při šířce pásma 1 MHz u stropního světla. . . . .	97
79	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru EVM při šířce pásma 1 MHz u stropního světla. . . . .	98
80	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru BER při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min. . . . .	99
81	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru $E_b/N_0$ při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min. . . . .	100
82	Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru EVM při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min. . . . .	101
83	Závislost MER na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz. . . . .	109

## Seznam tabulek

1	Parametr M pro dané modulace. . . . .	26
2	Parametry světla Fortimo LED DLM 3000 44W/840 Gen3. . . . .	45
3	Parametry LED - LA G6SP. . . . .	45
4	Vybrané funkce použité v aplikaci pro reálné měření přenosového kanálu. . . . .	48
5	Vybrané parametry fotodektoru PDA36A-EC. . . . .	51
6	Vybrané parametry plankonvexní čočky LA1252-A. . . . .	52
7	Vybrané parametry Bias-Tee ZX85-12G. . . . .	52
8	Nejvyšší přenosové rychlosti u různých meteorologických podmínek a šířek pásma. . . . .	66
9	Tabulka mezních hodnot optického výkonu laseru pro různé modulace a šířek pásma po průchodu mlhou. . . . .	86
10	Vybrané funkce použité v aplikaci pro simulaci přenosového kanálu. . . . .	93
11	Koeficienty pro parametr $E_b/N_0$ při šířce pásma 1 MHz u stropního světla. . . . .	102
12	Koeficienty pro parametr EVM při šířce pásma 1 MHz u stropního světla. . . . .	102

# 1 Úvod

Bezdrátový přenosový kanál je sdílený, přirozeně omezený zdroj, který má charakteristiku, která se mění s časem, frekvencí a prostorem. Rádiové vlny jsou ovlivněny různými jevy, které mohou způsobit chyby a mají vliv na kvalitu komunikace. Jedním z jevů je rušení. Rušení má negativní vliv na signál, který podléhá difrakci (viz kap. 2.3), lomu (viz kap. 2.2) či odrazu (viz kap. 2.1) během průchodu komunikačním kanálem. Právě tato práce se zaměřuje na různé fyzikální a statistické modely přenosového kanálu, s nimiž se můžeme setkat v reálném komunikačním prostředí.

Tato absolventská práce se zaměřuje na klasifikaci, popis, simulaci a hodnocení metod pro modelování moderního bezdrátového přenosového kanálu. Cílem práce je návrh, realizace a ověření funkčnosti virtuálního generátoru-analyzátoru digitálně modulovaných signálů, který bude umožňovat modelování nejčastěji vyskytujících se rušení v reálném bezdrátovém přenosovém kanále. Systém bude navržen pomocí vývojového prostředí LabVIEW na bázi softwarově definovaného rádia (SDR). Navržený systém bude vhodný pro testování nových i stávajících metod v moderních bezdrátových digitálních komunikačních systémech (např. adaptivní modulace, metody kanálové ekvalizace, adaptivní délky ochranného intervalu, apod.).

Kapitola 2 se věnuje popisu šíření signálu volným prostředím. Zde jsou popsány jednotlivá rušení, které se projevují během šíření signálu mezi vysílačem a přijímačem.

V následující kapitole 3 jsou popsány různé parametry přenosového kanálu, které sledujeme při měření bezdrátových signálů (např.  $E_b/N_0$ , EVM, BER apod.).

Kapitola 4 se věnuje radiokomunikačnímu řetězci a jeho obecnému schématu, které lze aplikovat na různé systémy například pro digitální systémy rozhlasu a televize nebo mobilní sítě.

V kapitole 5 jsou uvedeny popisy vybraných komunikačních modelů (např.: Fading and Multipath Models – Rayleigh, Rician, Nakagami-m, Weibull, Tapped delay model; Path Loss Model – Log-distance Path Loss Mod, Okumura-Hata Model, Noise Model).

Kapitola 6 obsahuje popis komunikace viditelným světlem (VLC). Obsahuje princip činnosti a samotné využití VLC např. Li-Fi, Vehicle to vehicle communication.

Kapitoly 7 až 9 se zabývají reálnou komunikací viditelným světlem. Je zde uveden návrh měřicí soustavy včetně obecného schématu. Dále jsou popsány všechny komponenty zapojené v měřicí soustavě např. vytvořená aplikace v LabVIEW, světla, BIAS tee, fotodetektor, USRP a další.).

Kapitola 8 se věnuje měření na vnitřním stropní světlo, kde je uvedeno nastavení měřicího systému a zpracované výsledky z měření. Totéž je uvedeno v kapitole 9, ale se zapojením brzdového zadního světla automobilu.

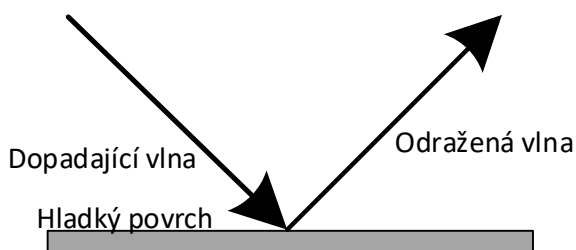
V kapitole 10 jsou uvedeny výsledky modelování a simulování bezdrátového přenosového kanálu. Je zde uveden popis simulační aplikace a porovnání reálných a simulovaných výsledků.

## 2 Šíření signálu volným prostředím

Rádiové vlny, během přenosu volným prostorem, interagují s objekty v okolí. Každá vlna je ovlivněna odlišně v závislosti na frekvenci tzn. nižší frekvence vlny mají lepší průchodnost objekty. Při průchodu rádiové vlny může dojít k odrazu (viz. kapitola 2.1), difrakci (viz. kapitola 2.2), a rozptylu (viz. kapitola 2.3). Toto vede k vícecestnému šíření [14], úniku (fading) [13] či útlumu [1], podrobněji v kapitole 3.

### 2.1 Odraz

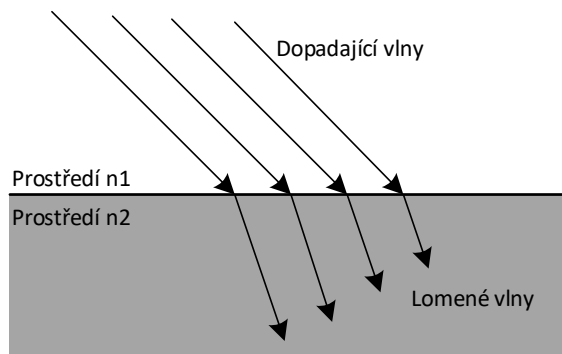
Odraz nebo-li reflexe nastává při dopadu elektromagnetické vlny na rozhraní dvou prostředí s různými dielektrickými vlastnostmi. Na rozhraní se může vlna odrazit zpět do prostředí odkud vlna přichází nebo se odrazit a pokračovat jiným směrem prostředím. Zde platí zákon odrazu, podrobnější informace o odrazu naleznete v [8].



Obrázek 1: Odraz (reflexe).

### 2.2 Lom

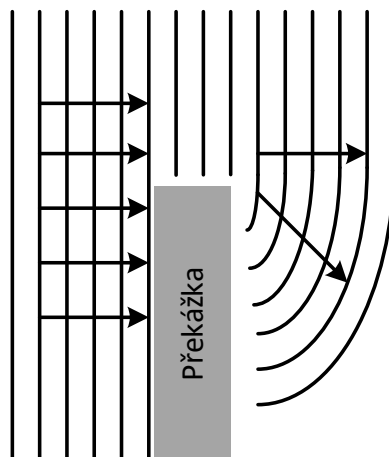
K lomu elektromagnetické vlny dochází na rozhraní dvou prostředí, kdy vlna přechází z jednoho prostředí do druhého v závislosti na indexu lomu prostředí. Příklad může být lom světla na hladině vody, podrobněji v [8].



Obrázek 2: Lom.

### 2.3 Ohyb

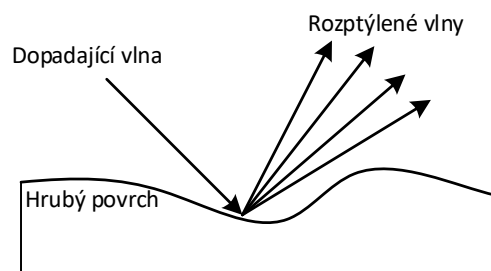
Ohyb nebo-li difrakce nastává pokud se v cestě šíření nachází objekt (překážka), vlny se ohýbají a pokračují ve svém šíření i v prostředí za překážkou. K ohybu vlnění dochází pouze, když je velikost objektu (překážky) menší nebo rovna vlnové délce vlnění.



Obrázek 3: Ohyb.

### 2.4 Rozptyl (Scattering)

Pokud elektromagnetická vlna dopadá na drsný povrch (není dokonale hladký), tak dochází k rozptylu. Energie dopadající vlny na rozhraní je rozptýlena do různých směrů tzn. vznikají nové vlnění. Příkladem je rozptyl vlnění na dešťových kapkách.

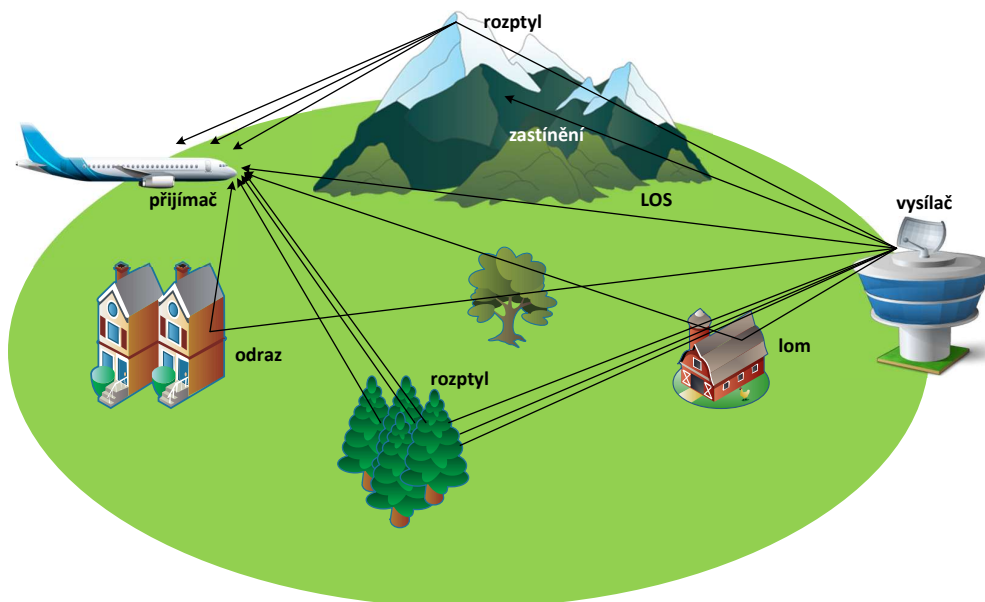


Obrázek 4: Rozptyl.

Existují různé druhy rozptylů např. Rayleighův, Miův, Ramanův, Brillouinův. Bližší informace najdete v [17].

## 2.5 Vícecestné šíření signálu

Vícecestné šíření elektromagnetické vlny je jev, který způsobuje, že vysílací signál přichází na přijímač (anténu) více než z jednoho směru. Důvodem jsou různé překážky ve směru šíření signálu, které způsobují lom, odrazy, rozptyl rádiových vln. Signály přijímané anténou jsou kvůli těmto jevům přijímány se zpožděním, s posunutou fází a jiným výkonovými úrovněmi.



Obrázek 5: Vícecestné šíření signálu.

## 2.6 Ztráty šířením

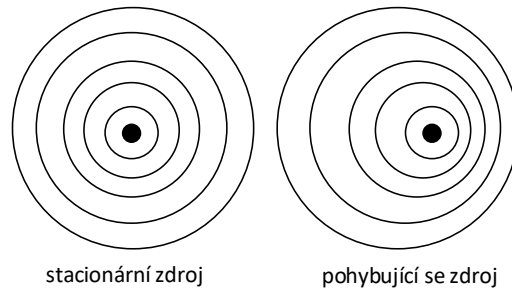
Síla přenášeného signálu se snižuje s rostoucí vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem. Útlum signálu taky závisí na prostředí, kterým radiové vlny prochází.

## 2.7 Atmosférické vlivy

Mezi atmosférické vlivy patří déšť, mlhy, smog, sníh apod. Během těchto vlivů dochází k útlumu radiové vlny, viz [14][15].

## 2.8 Dopplerův jev

K Dopplerovému jevu [12] dochází, když je elektromagnetická vlna šířena mezi dvěma objekty, které se vzájemně přibližují nebo oddalují. To vede ke změně vlnové délce a frekvence. Dopplerův jev je pozorován vždy, pokud se zdroj vlnění pohybuje vzhledem k pozorovateli.



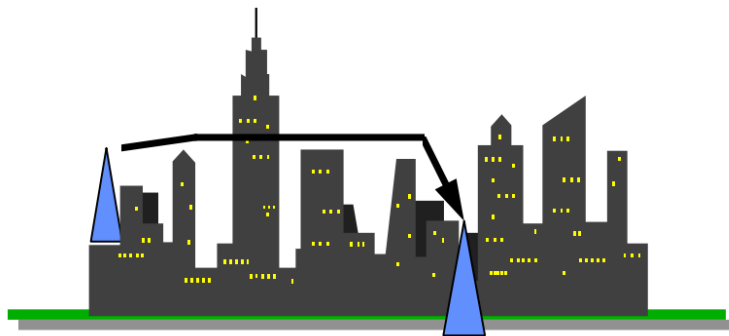
Obrázek 6: Dopplerův jev.

## 2.9 Pomalé úniky (Slow fading)

Pomalé úniky jsou způsobeny především terénem v blízkosti mobilního přijímače, jako jsou malé kopce a vysoké budovy apod. Dochází k zastínění (nepřímá viditelnost s vysílačem) spoje při pohybu antény, což vede k útlumu. Jde o pomalé kolísání úrovně vzhledem k vlnové délce.

## 2.10 Zastínění (Shadowing)

Ve volném prostředí se nachází několik překážek, které ovlivňují průchod signálu tímto prostředím. Zastínění nebo-li shadowing vzniká zastíněním přijímače v krátkém časovém úseku, které negativně ovlivňuje přenášený signál. Tento jev se nejčastěji projevuje v městských zástavbách, které brání průchodu signálu. Z tohoto důvodu jsou vysílače stavěny na vyšších místech.[1]



Obrázek 7: Zastínění (shadowing). [16]

### 2.11 Rychlé úniky (Fast fading)

Rychlé úniky nebo-li Fast fading jsou způsobeny rychlými změnami úrovně signálu v místě příjmu způsobené pohybem mobilní antény. Existuje mnoho fyzikálních faktorů, které mají za následek rychlých úniků:

- Vícecestné šíření signálu (viz. kap. 2),
- dopplerův jev (viz. kap. 2.8),
- šířka pásma,
- přenosová rychlost.

Omezení vlivu rychlých úniků lze vyřešit tak, že komunikace probíhá na více rádiových kanálech současně.

### 2.12 Útlum volného prostoru (FSPL)

Útlum volného prostoru FSPL (Free-Space Path Loss) [11] se používá v mnoha oblastech pro předpovídání síly rádiového signálu, které lze očekávat v rádiovém systému.

Během šíření elektromagnetické vlny volným prostředím dochází ke ztrátám (útlumu). Útlum trasy závisí na délce trasy, po které se signál šíří a frekvenci signálu. S rostoucí vzdáleností roste útlum a taky s rostoucí frekvencí signálu roste útlum. V obou případech platí přímá úměra.

Útlum šíření signálu ve volném prostředí je dán vztahy:

$$\text{FSPL} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 (\text{dB}) \quad (1)$$

nebo

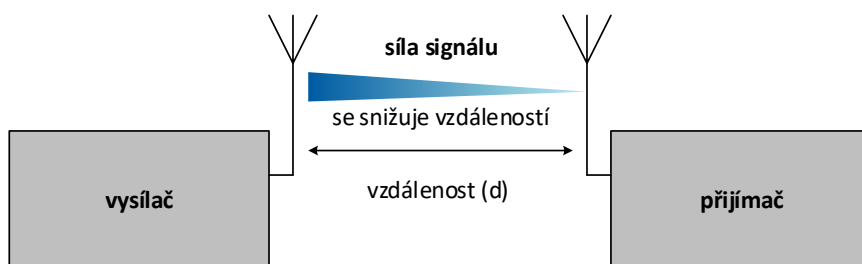
$$\text{FSPL} = \left( \frac{4\pi d f^2}{c} \right) (\text{dB}) \quad (2)$$



kde

- FSPL je útlum volného prostoru,
- $d$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem (m),
- $\lambda$  je vlnová délka elektromagnetické vlny (m),
- $f$  je frekvence elektromagnetické vlny (Hz),
- $c$  je rychlost světla ve vakuu (m/s).

Vztahy nezahrnují zisk antény a vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem musí být dostatečná.



Obrázek 8: Útlum volného prostoru.

## 3 Měření přenosového kanálu

### 3.1 Parametry přenosového kanálu

Při realizaci bezdrátového přenosu mezi přijímačem a vysílačem nás zajímají vstupní a hlavně výstupní hodnoty samotného přenosu informace. Můžeme sledovat různé úrovně signálu, hodnoty útlumu či chybovost. Více informací se dočtete v této kapitole.

#### 3.1.1 Poměr signál-šum (SNR)

Množství šumu a tím i poměr signálu k šumu [9] je klíčovým parametrem pro rádiového přijímače. Odstup signálu od šumu SNR je často taky označován jako míra výkonu citlivosti přijímače. To má zásadní význam ve všech aplikacích od jednoduchých rozhlasovými přijímači až po mobilní či bezdrátové komunikace.

Existuje celá řada způsobů, kterými lze měřit hodnotu šumu a tím i citlivost rádiového přijímače. Základní způsob je porovnání úrovně signálu a šumu pro známé úrovně signálu, tj. SNR. Je zřejmé, že čím větší je rozdíl mezi signálem a nežádoucím šumem (větší je poměr SNR), tím lepší je výkon citlivost rádiového přijímače.

Odstup signálu od šumu je poměr užitečného signálu a nežádoucího šumu:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{sum}}} (-) \quad (3)$$

kde  $P_{\text{signal}}$  je výkon užitečného signálu,  $P_{\text{sum}}$  úroveň šumu.

Udává-li se parametr SNR v (dB) platí pro něj následující rovnice:

$$\text{SNR} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{sum}}} \right) (\text{dB}) \quad (4)$$

kde  $P_{\text{signal}}$  je výkon užitečného signálu,  $P_{\text{sum}}$  úroveň šumu.

#### 3.1.2 Bitová chybovost (BER)

Bitová chybovost BER [10] je klíčovým parametrem, který se používá při posuzování systémů, které přenášejí digitální data z jednoho místa na druhé. Jak již název napovídá, bitová chybovost definována jako rychlost, při které dochází k chybám v přenosové soustavě. To může být přímo převedeno do počtu chyb, které se vyskytují v řetězci s uvedeným počtem bitů.

Definice bitové chybovosti lze popsat jednoduchým vzorcem:

$$\text{BER} = \frac{N_{\text{error}}}{N_{\text{all}}} (-) \quad (5)$$

kde  $N_{\text{error}}$  je počet chybně přijatých bitů,  $N_{\text{all}}$  je počet všech přijatých bitů.

### 3.1.3 Chybovost modulace (MER)

Mezi důležité parametry digitálního signálu patří i parametr MER (modulační chybový poměr). I zde hraje zásadní roli šum, který degraduje hodnoty amplitudy a fáze nosných vln. Stejně jako SNR, MER se obvykle vyjadřuje v decibelech (dB). [18]

Zjednodušeně se MER vypočte jako kvadratický průměr (RMS) síly referenčního vektoru ku chybovém:

$$\text{MER} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{error}}} (\text{dB}) \quad (6)$$

kde  $P_{\text{error}}$  je úroveň RMS chybového vektoru a  $P_{\text{signal}}$  je úroveň RMS ideálního vysílaného signálu.

Hodnotu MER lze vyjádřit i v procentech:

$$\text{MER} = \sqrt{\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{error}}}} (\%) \quad (7)$$

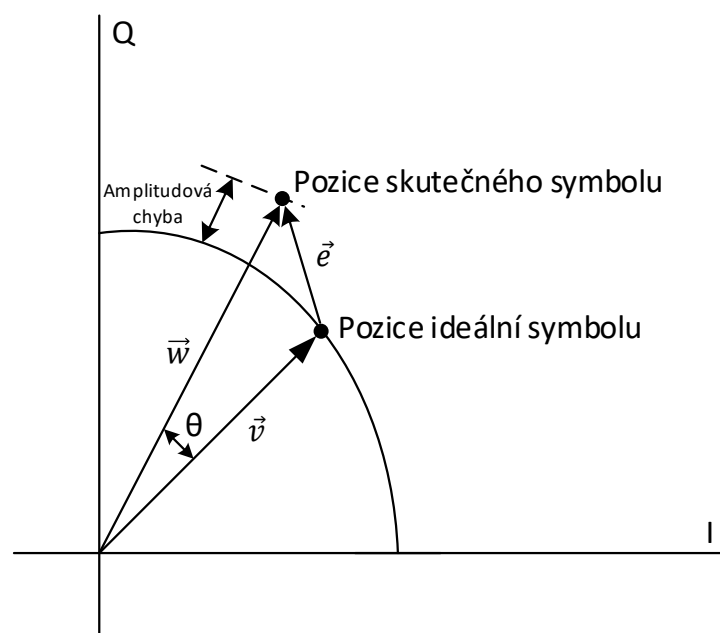
Chybový vektor je vektor v rovině mezi IQ ideální bodem konstelace a bodem přijatým přijímačem. Euklidovská vzdálenost mezi dvěma body je jeho velikost.

### 3.1.4 Error Vector Magnitude (EVM)

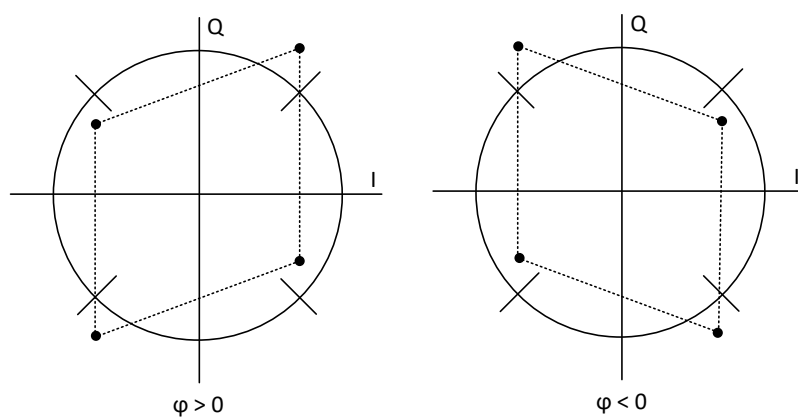
Parametr EVM je rozhodující hodnotou pro přesnost modulace. Poskytuje způsob jak měřit a vyhodnocovat multi-level, multi-fázové modulační metody např. M-QAM a M-PSK. Parametr EVM vychází ze srovnávání aktuálních hodnot amplitudy a fáze modulovaného signálu s referenčními hodnotami. Tyto hodnoty jsou průběžně vypočteny na základě hodnot přenosového systému. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami je EVM [18]. Grafickou reprezentaci lze vidět na obrázku č. 9, kde  $\vec{v}$  je ideální symbolový vektor,  $\vec{w}$  je naměřený symbolový vektor,  $\vec{w} - \vec{v}$  je amplitudová chyba,  $\theta$  je fázová chyba,  $\vec{e} = (\vec{w} - \vec{v})$  je chybový vektor a  $\vec{e}/\vec{v}$  je EVM.

### 3.1.5 Quadrature Error (QE)

Parametr Quadrature Error (chyba ortogonalit) je označována také jako kvadrturní zkosení. Chyba ortogonalit nastává v případě, že komplexní složky I a Q nejsou dokonale ortogonální a dochází ke zkreslení konstelačního i vektorového diagramu. Kvadrturní zkosení může být pozitivní nebo negativní se znaménkem udávající orientaci chyby viz. obrázek 10.



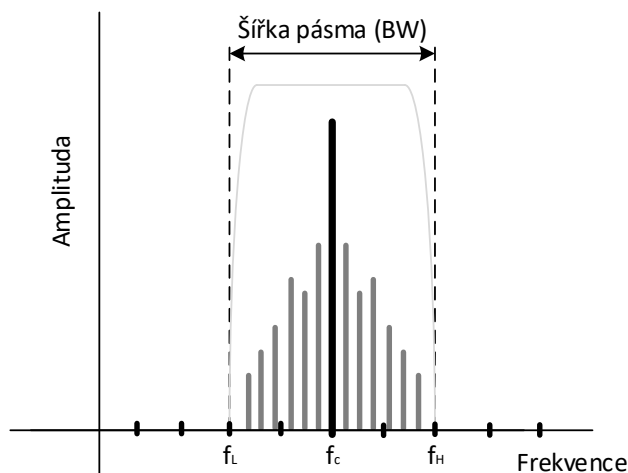
Obrázek 9: Grafické znázornění chybového vektoru.



Obrázek 10: Kvadraturní zkosení.

### 3.2 Šířka pásma

Šířka pásma (Bandwidth) je důležitým parametrem modulací. Je to interval frekvencí, které dokáže přenosový kanál přenést. Lze taky říct, že je to rozdíl nejvyšší ( $f_H$ ) a nejnižší ( $f_L$ ) frekvence přenášeného signálu. Často je označována znakem BW a její jednotkou je frekvence (Hz). Frekvenční spektrum a šířka kanálu je zobrazena v následujícím obrázku č. 11.



Obrázek 11: Grafické znázornění šířky pásma.

Obecně platí, že s větší šířkou pásma jsme schopni dosáhnout větších přenosových rychlostí.

### 3.3 Přenosová a modulační rychlost

Přenosová rychlost (Bit rate) udává počet přenesených bitů za sekundu a základní jednotkou je bit za sekundu (bit/s). Modulační rychlost (Symbol Rate) udává počet přenesených symbolů za sekundu na výstupu modulátoru neboli rychlost změn jednotlivých stavů modulace za sekundu. Jednotkou této rychlosti je Baud (Bd) a vypočítá se ze vztahu:

$$V_m = \frac{1}{a} \quad (\text{Bd}) \quad (8)$$

kde  $a$  je doba trvání signálové prvku.

Je třeba si taky uvědomit, že modulační rychlost je závislá na šířce pásma a lze ji popsat následujícím vztahem:

$$V_m \leq 2 \cdot f_m \quad (9)$$

kde  $f_m$  je mezní kmitočet. Ze vztahu plyne, že modulační rychlost nesmí nabývat hodnot větších než  $2f_m$ .

Spojitost mezi přenosovou a modulační rychlosti popisuje následující vztah:

$$V_p = V_m \log_2(M) \quad (\text{bit/s}) \quad (10)$$

kde  $M$  je modulační formát neboli počet stavů dané modulace. Příklady parametru  $M$  pro dané modulace jsou zobrazeny v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Parametr  $M$  pro dané modulace.

Modulace	Počet stavů
BPSK	$M=2$
QPSK	$M=4$
8-QAM	$M=8$
16-QAM	$M=16$
32-QAM	$M=32$
64-QAM	$M=64$
128-QAM	$M=128$
256-QAM	$M=256$

### 3.4 Digitální modulace

U analogových modulací je možné ovlivňovat frekvenci, amplitudu či fázi nosného signálu. To stejné probíhá i u digitálních modulací, které jsou popsány v této kapitole.

Digitální modulace moduluje tři parametry sinusového signálu. Tyto tři parametry jsou amplituda  $A$ , fáze  $\theta$  a frekvence  $f$ :

$$s(t) = A \times \cos(2\pi \times f_c \times t + \theta k) \quad (11)$$

#### 3.4.1 Amplitudová modulace (ASK)

Amplitude-shift keying (ASK) - klíčování amplitudovým posuvem je amplitudovou modulací, která přiřazuje hodnoty jednotlivých bitů do oddělených úrovní amplitud. Amplituda nosné vlny se mění v souladu se základním pásmem digitálního vstupního signálu. Obrázek č. 12 zachycuje provoz ASK modulace. Jak je znázorněno na obrázku, binární 1 zastupuje nosný signál s nějakou amplitudou, zatímco binární 0 je zastoupena nosičem nulové amplitudy.

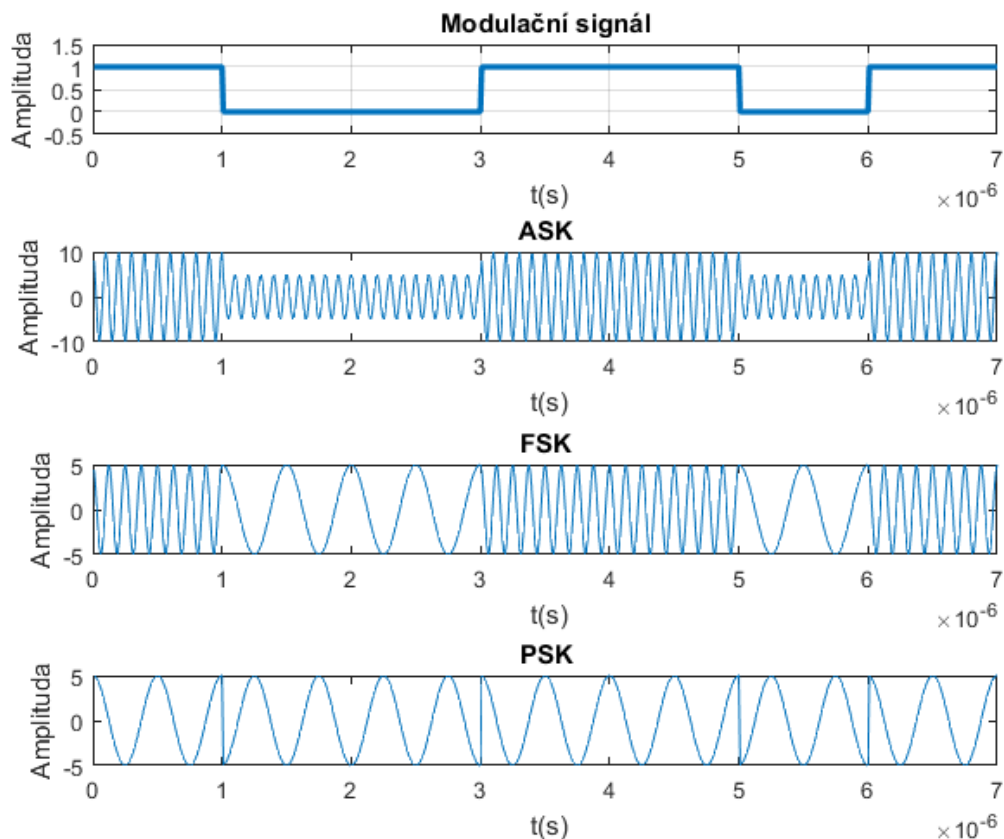
#### 3.4.2 Frekvenční modulace (FSK)

Frequency Shift Keying (FSK) - klíčování frekvenčním posuvem je frekvenční modulace, u které se přenáší digitální informace pomocí diskrétních změn frekvence nosné vlny. Nejjednodušším případem FSK je binární BFSK modulace, která využívá dvou frekvencí pro přenos binárních

jedniček a nul. Základní princip frekvenční modulace je znázorněna na obrázku č. 12.

### 3.4.3 Fázová modulace (PSK)

Phase Shift Keying (PSK) - klíčování fázovým posuvem je digitální modulace, která pro přenos informací využívá okamžité změny fáze nosné vlny. Při změně modulačního signálu z logické jedničky na nulu se změni fáze nosné o  $180^\circ$ .



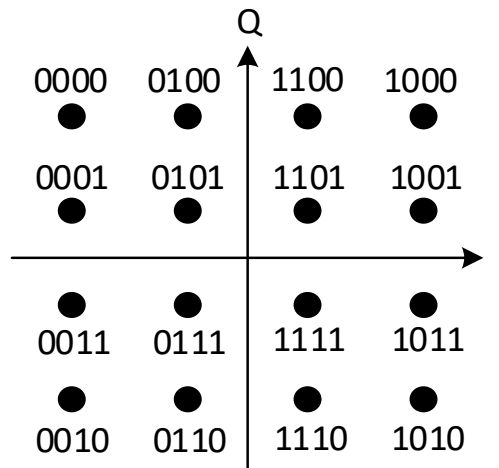
Obrázek 12: Modulace ASK, FSK a PSK.

### 3.4.4 Kvadrurní amplitudová modulace (QAM)

Kromě základních digitálních modulací existují tzv. složené digitální modulace. Příkladem je kvadrurní amplitudová modulace (QAM). Tato modulace je kombinací modulací ASK a FSK. QAM modulace využívá 2 nosných signálů, které jsou navzájem posunuty o  $90$  stupňů a mají konstantní frekvenci (kvadrurní nosné). Bity modulačního signálu se rozdělí na 2 dílčí toky. Každý z nosných signálů je modulován amplitudově pomocí jednoho toku modulačního signálu.

Poté jsou oba modulované signály opět sečteny a tím získáme QAM modulaci.

V praxi se často setkáváme s vícestavovými modulacemi – 16-QAM, 64-QAM či 256-QAM. K znázornění QAM modulace se využívá konstelační diagram, který obsahuje body se vzájemným fázovým posunem, a s amplitudovou modulací (viz obrázek 13).



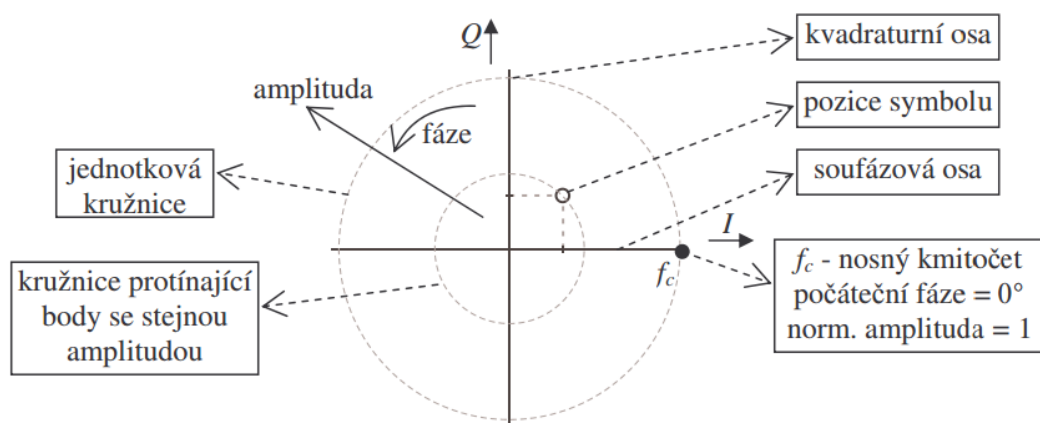
Obrázek 13: Konstelační diagram kvadraturní amplitudové modulace (16-QAM).

### 3.5 Konstelační diagram

Konstelační diagram je grafické znázornění složek signálu modulovaných systémem digitální modulace. Zobrazuje signál jako dvourozměrný bodový diagram v komplexní rovině. Jednotlivé symboly jsou znázorněny jako body v komplexní rovině. Imaginární a reálná složka os se často nazývá jako soufázová (v angl. in phase) nebo osa I a kvadraturní neboli osa Q. Vynesení těchto symbolů v korelačním diagramu vznikne konstelační diagram. Příkladem může být konstelační diagram 16-QAM modulace (viz obrázek 13).

Fázové posuny se volí tak, aby mezi body v diagramu byla možná, co největší vzdálenost tzn. nejvyšší odolnost proti rušení a chybám.



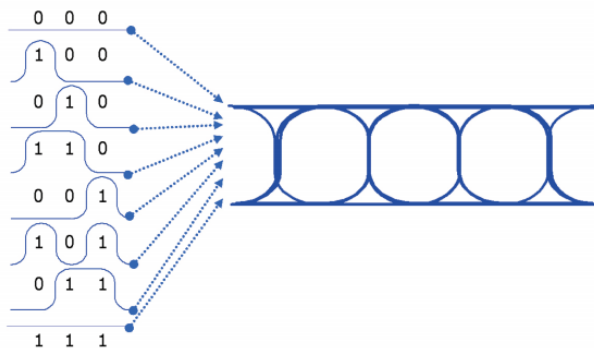


Obrázek 14: Orientace v konstelačním diagramu.

### 3.6 Diagram oka

Diagramy oka jsou velmi úspěšnými způsoby, jak rychle a intuitivně posoudit kvalitu digitálního signálu. Pomocí diagramu můžeme diagnostikovat kanálové chyby, bitové chybovosti, SNR.

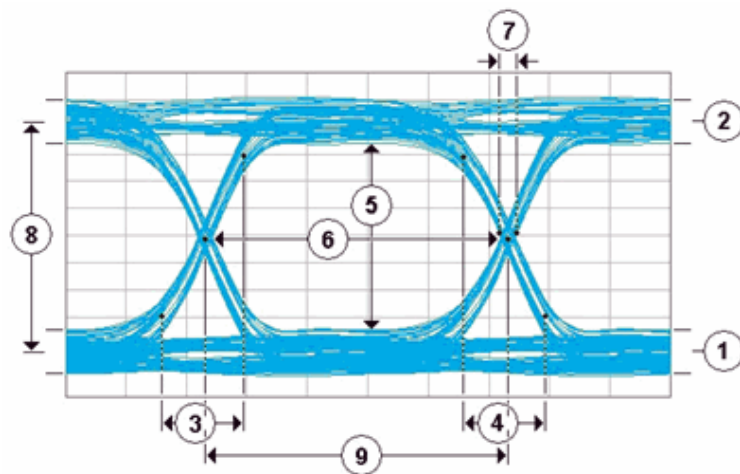
Tvar prezentace diagramu oka by měl obsahovat všechny kombinace bitové sekvence. Pomocí nich je možné detekovat chyby. Příkladem je vznik diagramu oka viz. obrázek 15.



Obrázek 15: Překrývání bitových sekvencí pro vytvoření diagramu oka.

V následujícím obrázku č. 16 jsou popsány klíčové parametry diagramu oka, které sledujeme během analýzy signálu.

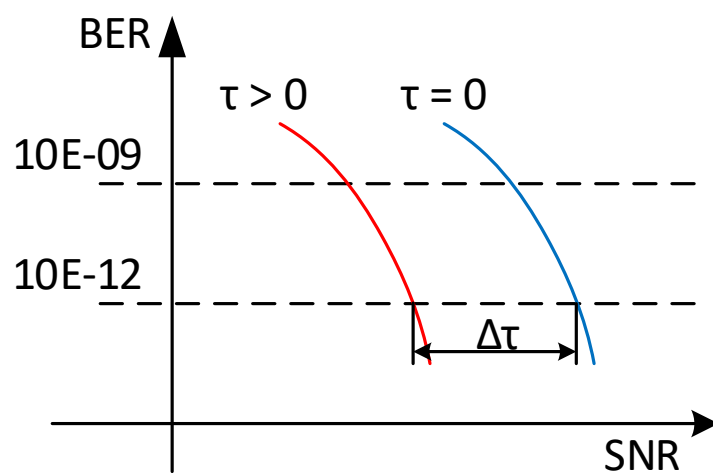
1. Zero Level - střední hodnota logické 0
2. One Level - střední hodnota logické 1
3. Doba náběhu (Rise Time) - Doba náběhu je měřítkem přechodové doby dat z 10 % úrovně na úroveň 90 % na vzestupné hraně.



Obrázek 16: Klíčové parametry diagramu oka.

4. Doba poklesu (Fall Time) - Doba poklesu je měřítkem přechodové doby dat z 90 % úrovně na úroveň 10 % na klesajícím hraně.
5. Výška oka (Eye Height) – Výška oka nám označuje zavírání oka. Zavírání oka je způsobeno šumem.
6. Šířka oka (Eye Width) – Označuje přesnost mezi přechody.
7. Deterministic Jitter - Deterministický jitter je odchylka přechodu ze své ideální doby v důsledku odrazů ve srovnání s jinými přechody.
8. Amplituda oka (Eye Amplitude) - Je rozdíl mezi úrovní logické 1 a logické 0.
9. Bit Period - Bitová perioda.

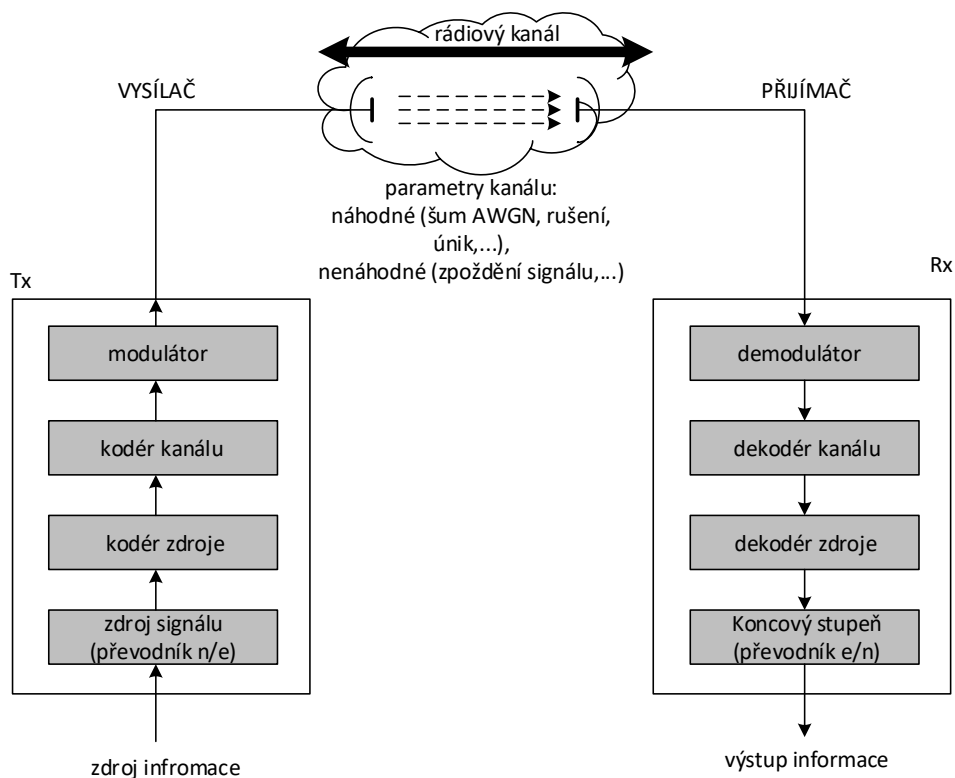
S tímto diagramem úzce souvisí parametry BER (viz. kapitola 3.1.2) a SNR (viz. kapitola 3.1.1). Na obrázku č. 17 můžeme vidět závislost těchto dvou parametrů. Zvyšováním odstupu signálu od šumu klesá hodnota bitové chybovosti.



Obrázek 17: Závislost BER na SNR.

## 4 Radiokomunikační řetězec

Na obrázku 18 je zobrazeno obecné schéma (Claude E. Shannon) rádiového komunikačního systému. Schéma lze aplikovat na různé systémy například digitální systémy rozhlasu a televize nebo mobilní sítě, více naleznete [1].



Obrázek 18: Radiokomunikační řetězec.

Základní popis vysílací strany (Tx):

- zdroj signálu: převod obvykle neelektrického signálu na elektrický (mikrofon, snímací elektronika)
- kodér zdroje: převod analogového signálu na digitální (redundance – potlačení nadbytečných informací, irrelevance – nepodstatná informace)
- kodér kanálu: systémy, které minimalizují vzniklé chyby (prokladače, korekční, detekční kódy)
- modulátor: příprava signálu na přenos (modulace)

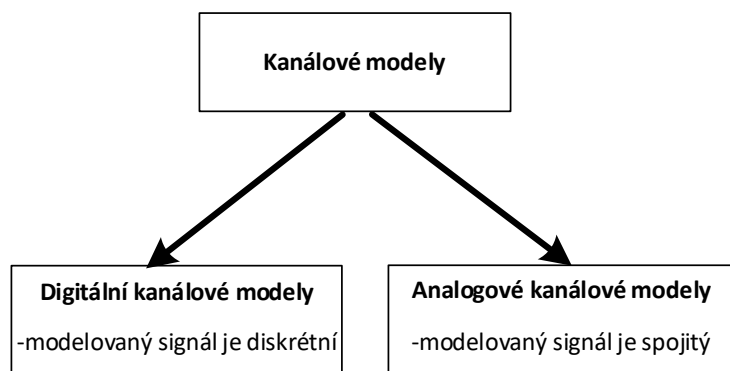
- rádiový kanál: fyzikální prostřední mezi vysílačem a přijímačem, které slouží k přenosu signálu.

#### 4.1 Komunikační kanál

Komunikační kanál je médium používané pro přenos informací z jednoho vysílače jednomu nebo více přijímačům. Kanál má určitou kapacitu pro přenos informací definovanou šířkou pásma.

#### 4.2 Modelování kanálu

V ideálním případě můžeme definovat modelování kanálu jako stanovení (výpočet) všech fyzikálních procesů (jevů), které budou mít vliv na signál přenášený z vysílače k přijímači volným prostředím. Kanálové modely můžeme rozdělit na analogové a digitální (viz. kapitola 5).



Obrázek 19: Kanálové modely.

## 5 Modely komunikačního kanálu

Během přenosu signálu volným prostředím dochází k degradaci signálu různými vlivy. Proto byly a jsou vyvíjeny různé modely, které tyto negativní jevy popisují. Tyto modely jsou popsány matematicky a jsou pomocí počítačů simulovány. Obvykle popisovat všechny jevy, které mohou způsobit chyby, je příliš velký problém. Vzhledem k tomu, že síla přijímaného signálu určuje výkon systému, je důležité znát ztráty šířením (pathloss) a statistiky úniků.

Základní vzorec pro celkový útlum je popsán následujícím způsobem:

$$y(t) = a(t) \times b(d) \times x(t) + n(t) \quad (12)$$

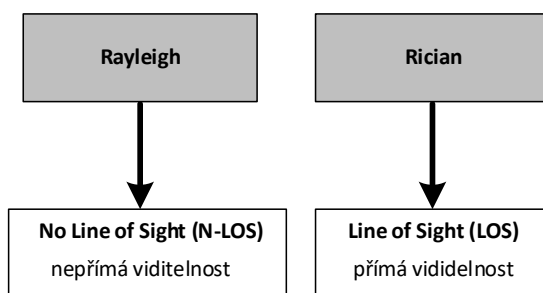
kde

- $a(t)$  jsou úniky (fading)
- $b(d)$  jsou ztráty šířením, které mohou být deterministické
- $n(t)$  představuje šum (noise)

### 5.1 Únikové a vícecestné modely (Fading and Multipath Models)

Vícecestné úniky v bezdrátových komunikačních systémech jsou obvykle modelovány Rayleighovým a Ricianovým modelem.

Přibližné hodnoty útlumu v důsledku vícestného úniku v bezdrátových kanálech lze stanovit Rayleighovým modelem (v případě, není přímá viditelnost – N-LOS) a Ricianovým modelem (v případě, kdy je přímá viditelnost – LOS).



Obrázek 20: Rozdělení: Rayleigh a Rician.

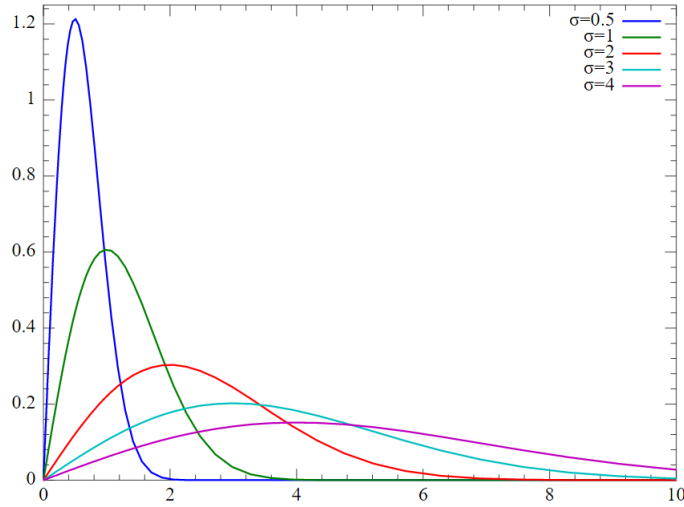
### 5.1.1 Rayleigh model

Základní Rayleighův model předpokládá, že přijatý vícecestný signál se skládá z velkého počtu odražených vln s rozdílnými fázemi. Tento model může být použit v prostředích jako jsou mobilní systémy bez přímé viditelnosti (N-LOS) mezi vysílačem a přijímačem.

Rayleigh PDF (Probability Density Function) je dána:

$$P(\chi; \sigma) = \frac{\chi}{\sigma^2} e^{\frac{-\chi^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

kde  $\chi \geq 0$  a  $\sigma$  je měřítko (scale).



Obrázek 21: Rayleigh PDF s různými měřítky.

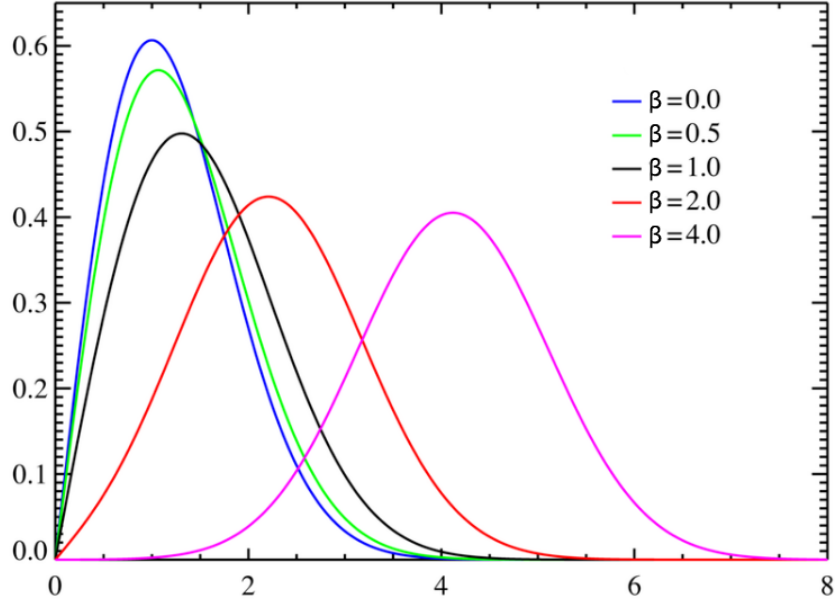
Na obrázku č. 21 můžeme vidět pravděpodobnostní funkci (PDF) impulsní charakteristiky (odezvy) kanálu, který je modelován Rayleighovým modelem. To je užitečné při modelování nejhoršího případu, kdy není přítomna žádná dominantní složka signálu.

### 5.1.2 Rician model

Ricianův model je použitelný v případech, kdy existuje dominantní signál LOS – tedy jedná se o přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Příkladem může být interní síť uvnitř budov.

Rician PDF (Probability Density Function) je dána:

$$P(\chi|\alpha, \beta) = \frac{\chi}{\alpha^2} \exp\left(\frac{-(\chi^2 + \beta^2)}{2\alpha^2}\right) I_0\left(\frac{\chi\beta}{\alpha^2}\right) \quad (14)$$



Obrázek 22: Pravděpodobnostní funkce (pdf) Rician distribuce s různými tvary (shape).

kde  $\alpha$  představuje špičatost a  $\beta$  představuje měřítko. Rician kanál může být popsán dvěma parametry:

$$K = \frac{\alpha^2}{2\beta^2} \quad a \quad \Omega \quad (15)$$

kde  $K$  je poměr výkonu signálu přímé cesty a rozptýlené cesty. Znak  $\Omega$  představuje výkon přímé cesty a působí jako měřítko.

### 5.1.3 Tapped delay model

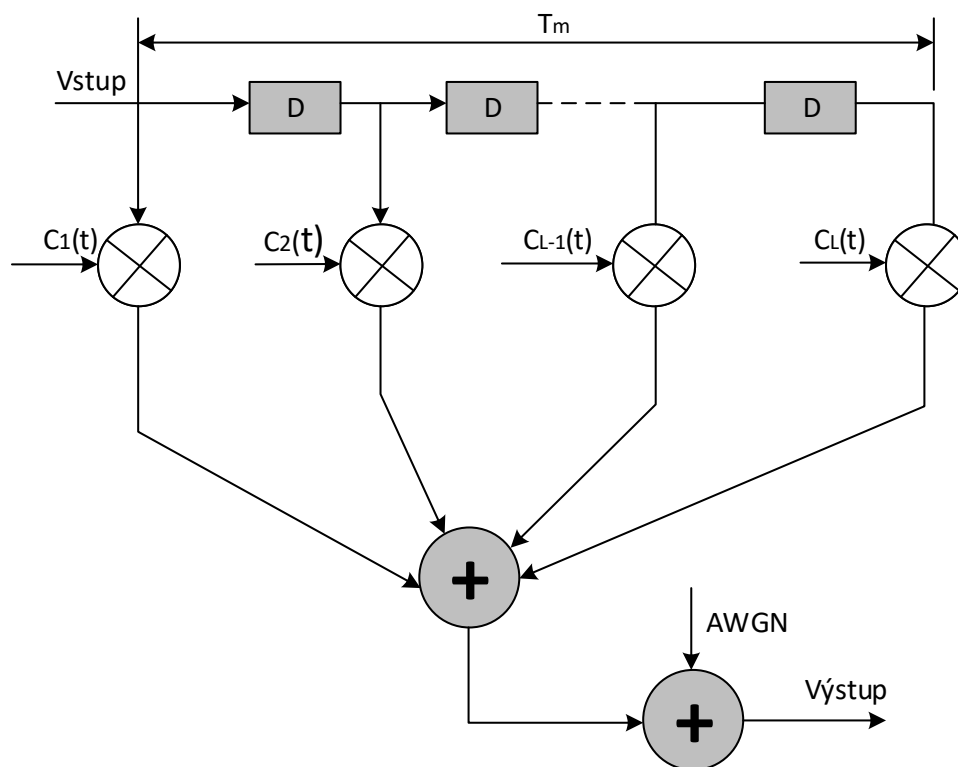
Pro běžný model rádiového kanálu s únikem se používá tzv. TDL (Tapped Delay Line). Symbol  $D$  představuje zpoždění mezi jednotlivými cestami. Samotné celkové zpoždění se pak rovná maximálnímu časovému rozšíření kanálu  $T_m$ . Symboly  $c(t)$  jsou označeny komplexní, obecně časově proměnné zeslabení jednotlivých cest. Tento model může mít celkem  $L$  cest. Schéma TDL je zobrazeno na obrázku č. 23 [7]

Jeden způsob, jak reprezentovat impulzní odezvy vícecestného kanálu je prostřednictvím diskrétního počtu impulzů, který lze popsat následujícím způsobem:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N c_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (16)$$

kde  $N$  je počet tapů a  $c_i$  ( $\tau$  jsou časově závislé komplexní koeficienty pro tapy a  $\tau_i$  je zpoždění  $i$ -tého tapu. Všimněte si, že impulzní odezva  $h$  se mění s časem  $t$ .





Obrázek 23: Tapped Delay schéma.

## 5.2 Path Loss modely

### 5.2.1 Log-distance Path Loss Model

Log-distance path loss model je formálně vyjádřen jako

$$PL = P_{TxdBm} - P_{RxdBm} = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_g \quad (17)$$

kde

- PL představuje celkové ztráty měřené v decibelech (dB)
- $P_{TxdBm} = 10 \log_{10} \frac{P_{Tx}}{1mW}$  je přenášený výkon v dBm, kde  $P_{Tx}$  je přenášený výkon ve wattech.
- $P_{RxdBm} = 10 \log_{10} \frac{P_{Rx}}{1mW}$  je přijatý výkon v dBm, kde  $P_{Rx}$  je přijatý výkon ve wattech.
- $PL_0$  jsou ztráty při referenční vzdálenosti  $d_0$ . Jednotka je decibel (dB)
- $d$  je délka cesty.
- $d_0$  je referenční vzdálenost, obvykle 1 km (nebo 1 míle).
- $\gamma$  je ztrátový (path loss) exponent.

$X_g$  je normální (nebo gaussovská) náhodná veličina s nulovou střední hodnotou, což se odráží v útlumu (dB) způsobené plochým únikem (flat fading). V případě situace bez úniků je tato proměnná je 0. Pouze v případě zastínění (shadow fading) nebo pomalého úniku (slow fading) může mít tato náhodná veličina Gaussovou distribuci s  $\sigma$  směrodatnou odchylkou v dB, což vede k log-normal distribuci přijatého výkonu ve wattech. V případě rychlého úniku, způsobený vícecestným šířením, odpovídá zisk ve Wattech  $F_g = 10^{-\frac{X_g}{10}}$  a může být modelován jako náhodná proměnná s Rayleighovou nebo Ricianovu distribucí [22].

### 5.2.2 Okumura-Hata Model [22]

Okumura-Hata model lze popsat dvěma způsoby:

V prvním případě – pathloss (v dB):

$$PL = P_{freespace} + A_{exc} + H_{cb} + H_{cm} \quad (18)$$

kde  $P_{freespace}$  jsou ztráty (pathloss) ve volném prostoru,  $A_{exc}$  nadbytečné pathloss (jako funkce vzdálenosti a frekvence) pro výšku BS:  $h_b = 200$  m a MS:  $h_m = 3$  m.

Běžnější formou je:

$$PL = A + B \times \log(d) + C \quad (19)$$

kde  $A$ ,  $B$ , a  $C$  jsou faktory, které jsou závislé na frekvenci a výšce antény. Model je určen pro velké buňky, kde nejsou žádné dominantní překážky mezi základnovou stanicí a mobilní stanicí a změny v profilu terénu nejsou časté.

### 5.3 Šumové modely

#### 5.3.1 Aditivní bílý gaussovský šum (AWGN)

Aditivní bílý gaussovský šum (AWGN) je vždy přítomen v praxi, protože se pochází z mnoha přírodních zdrojů, jako je Země a Slunce. Tento šum je nejzákladnější rušící model v bezdrátovém přenosovém kanálu.

Bílý šum na vstupu přijímače lze popsat následujícím způsobem:

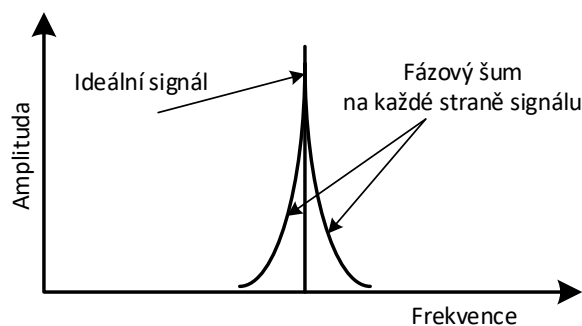
$$Y(t) = X(t) + N(t) \quad (20)$$

kde  $X(t)$  je vstupní signál a  $N(t)$  představuje bílý Gaussovský šum.

#### 5.3.2 Fázový šum

Určitá míra fázového šumu existuje na všech signálech a rozšiřuje se na obě strany od požadovaného signálu. Tvar fázového šumu bude záviset na tom, zda se jedná o volný běh oscilátoru, nebo se jedná o fázový závěs (PLL).

Pozn. Fázový závěs (Phase-Locked Loop - PLL) je řídicí systém (elektr. obvod), který generuje výstupní signál o stejné fázi a frekvenci jako má signál vstupní. Fázový šum vzniká v důsledku



Obrázek 24: Fázový šum volně běžícího oscilátoru.

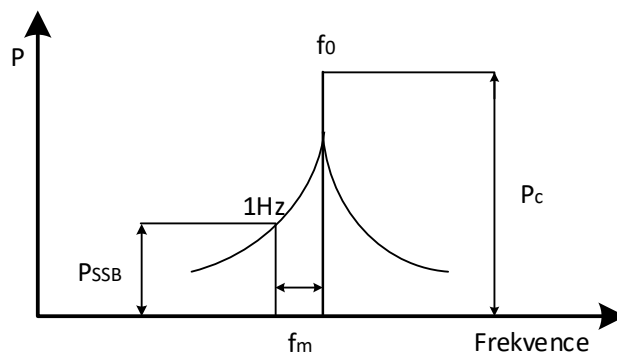
změn průchodu signálu nulou oproti ideálnímu průběhu - fluktuace fáze signálu. Tento fázový

šum může být velice intenzivní a je důležitým parametrem vysokofrekvenčních zdrojů. [19]

Fázový šum na ofsetovém kmitočtu  $f_m$  je popsán vztahem:

$$L_{dB}(f_m) = 10 \log \frac{P_{SSB}}{P_c} \quad \text{dBc/Hz} \quad (21)$$

kde  $P_{SSB}$  je hustota výkonu signálu v kmitočtovém pásmu šířky 1 Hz na ofsetovém kmitočtu  $f_m$  a  $P_c$  je celkový výkon signálu (nosné) s kmitočtem  $f_0$  (nosná). Označení dBc vyjadřuje, že se jedná o poměrné vyjádření vztažené k výkonu nosné. [19]

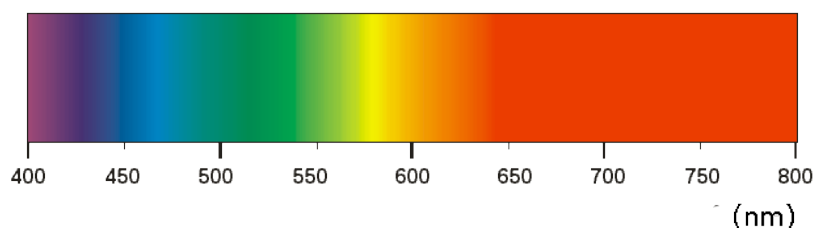


Obrázek 25: Fázový šum.

## 6 Komunikace viditelným světlem

Komunikace viditelným světlem (Visible Light Communication), dále jen VLC, spadá do odvětví bezvláknových optických komunikací. Obecně jde o systém, který vysílá informace modulováním světla, které je zároveň viditelné pro lidské oko. Dosavadní zdroje světla slouží primárně k osvětlení a VLC navíc nabízí možnost komunikace viditelným světlem. [20]

Systémy VLC využívají viditelné světlo pro komunikaci, které využívá spektrum vlnových délek od 380 do 790 nm, což odpovídá frekvencím od 430 THz do 790 THz zobrazeno na obr. č. 26. Obecně v RF komunikacích je problém s nízkou šířkou pásma. Tento problém řeší VLC, která nabízí vyšší možnosti volby šířky pásma. [21]



Obrázek 26: Viditelné spektrum.

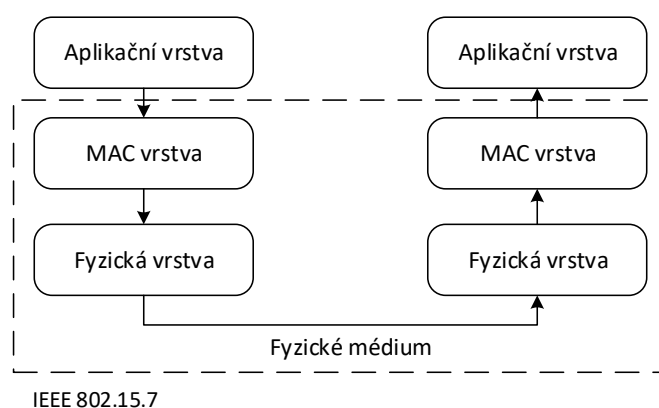
Přijímač VLC přijímá signály pouze v případě, že jsou umístěny ve stejné místnosti jako vysílač, proto přijímače mimo místnosti s vysílačem nemohou přijímat signály. Z tohoto vyplývá lepší zabezpečení komunikací a odolnost proti odposlechům než je u RF komunikací. Jelikož viditelný světelný zdroj může být použit pro osvětlení i komunikaci, tak nabízí lepší využití energie než je požadována u RF komunikací. [21]

### 6.1 Architektura a princip činnosti VLC

Základními prvky VLC systému je vysílač a přijímač. Referenční model komunikačního systému VLC se skládá z tří vrstev: fyzická vrstva (PHY), přístupová vrstva (MAC) a aplikační vrstva viz obr. č. 27. Ve standardu IEEE 802.15.7 jsou pouze dvě vrstvy: PHY a MAC jsou definovány pro jednoduchost [21]. Základními prvky VLC systému je vysílač (LED dioda) a přijímač (fotodioda). LED dioda převádí elektrický signál na optický. Informace jsou modulovány a kódovány (linkové kódy) fyzickou vrstvou, které jsou následně vysílány viditelným světlem LED diody. Na straně přijímače fotodioda přemění optický signál na elektrický. Tento signál je demodulován a dekódován fyzickou vrstvou. MAC vrstva se stará o kontrolu přístupu k médiu. [20]

### 6.2 Aplikace VLC

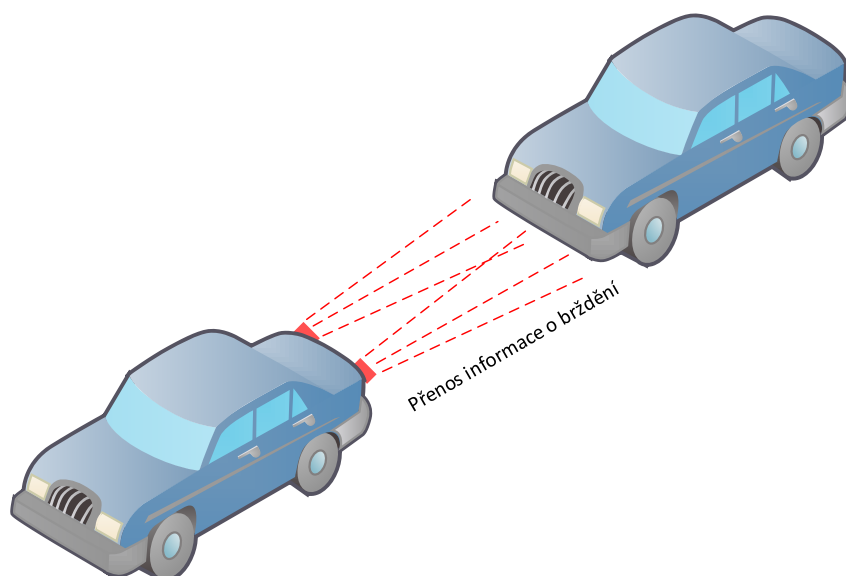
Mezi základní rysy VLC patří velká šířka pásma, energetická nenáročnost, žádné zdravotní riziko a použití nelicencovaných pásem. Tyto rysy jsou atraktivní pro následující aplikace:



Obrázek 27: Architektura VLC.

### 6.2.1 Vehicle to vehicle communication

Systém VLC lze taky využít pro dopravní komunikace z důvodu přítomnosti vozidel a infrastruktury semaforů. U toho systému je cílem zvýšit bezpečnost na silnici. Patří zde několik aplikací jako varování před čelní kolizí, nouzové elektronické brzdové světla, varování pro změnu jízdního pruhu, varování před nehodou, varování pro změnu rychlosti či další dopravní informace. Tyto aplikace vyžadují spolehlivou dosažitelnost s extrémně nízkou latencí, které systém VLC splňuje. Proto byl navržen venkovní systém VLC pomocí Controller Area Network (CAN) se zadních a předních světel automobilů ke komunikaci viz obrázek č. 28.



Obrázek 28: Aplikace systému VLC v dopravě.

### 6.2.2 Li-Fi

Light Fidelity (Li-Fi) je vysokorychlostní duplexní bezdrátová síť, která využívá viditelné světlo ke komunikaci. Li-Fi je podobná Wi-Fi sítím. Jedna z výhod této sítě je několikanásobně vyšší rychlost než u RF komunikací díky větší šířce pásma, kterou VLC nabízí. Obecně Wi-Fi sítě mají problém interference s jinými vysokofrekvenčními signály. Proto Li-Fi nabízí řešení tohoto problému v oblastech citlivé na elektromagnetické záření. [21]

### 6.2.3 Podmořské komunikace

Další možností je využití VLC v podmořských komunikacích. Rádiové vlny jsou pohlcovány samotnou slanou vodou, kvůli zvýšené vodivosti této vody. Proto VLC komunikace by měly být použity v podmořských komunikačních sítích. Jedná z aplikací jsou dálkové ovládané ponorky.[21]

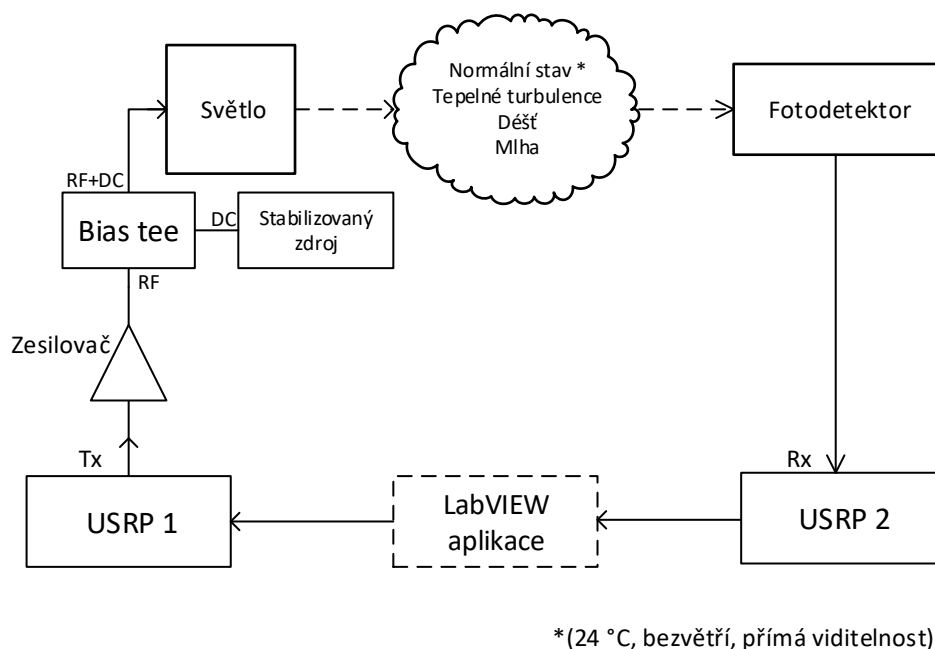
### 6.2.4 Další využití VLC

Systém VLC je možné taky využít v nemocnicích tam, kde je aplikace RF nevhodná např. u přístrojů magnetické rezonance. Dalšími možnostmi jsou:

- přenos hudby pomocí červené, zelené a modré LED diody,
- informace zobrazující panely (reklamy, dopravní informace atd.),
- využití stropních světel ke komunikaci (nahrazení WLAN sítí).

## 7 Návrh měřicí soustavy

Návrh měřicí soustavy se skládá z několika částí. Základem je vytvořená aplikace v LabVIEW, která slouží pro nastavení parametrů vysílače/přijímače (typ modulace, nosná frekvence, šířka pásma, atd.) a pro samotné měření. Výstup aplikace je přiveden na USRP, které má funkci fyzického vysílače. Následovně je připojen do měřicí soustavy zesilovač, bias tee a dané světlo. Mezi světlem a fotodetektozem je volný prostor, kde se mění meteorologické podmínky (mlha, déšť, tepelné turbulence). Za fotodetektozem je umístěno další USRP, jehož výstup je propojený opět z aplikací, kde se provádí veškerá měření. Grafické znázornění měřicí soustavy lze vidět na obrázku č. 29. Podrobněji popsání nástroje a komponenty jsou uvedeny v následujících podkapitolách.



Obrázek 29: Obecné schéma měřicí soustavy.

### 7.1 Použité nástroje a komponenty v měřicí soustavě

Celá měřicí soustava se skládala z několika nástrojů a elektronických komponent (např. zesilovač, světla, USRP atd.). Všechny použité nástroje a komponenty jsou popsány v následujících podkapitolách.



### 7.1.1 Světla

Pro měření byly použity dvě odlišná světla. Jako první bylo vnitřní stropní světlo, které slouží k osvětlení místností. Jednalo se o stropní světlo od firmy Philips a to Fortimo LED DLM 3000 44W/840 Gen3 z řady Philips Fortimo LED Downlight Module System. Toto světlo nabízí vysokou energetickou účinnost a vysokou životnost až 50 000 hodin svícení. V následující tabulce č. 2 jsou uvedeny vybrané parametry tohoto stropního světla. Více informací naleznete na příloženém CD.

Tabulka 2: Parametry světla Fortimo LED DLM 3000 44W/840 Gen3.

Světelný tok (lm)	3000
CRI	80
CCT (K)	4000
Vstupní výkon (W)	46.0
Efektivita (Lm/W)	68.0
Vstupní napětí (V)	220-240
Max. životnost (hodiny)	50 000
U <sub>max</sub> dc (V)	80
Max. provozní teplota (°C)	65
P <sub>max</sub> (W)	40

Jako druhé světlo bylo zvoleno zadní brzdové světlo ŠKODA Octavia III od firmy Varroc lighting systems s.r.o. Typickým poznávacím znakem „při zapnutém osvětlení, je tvar písmene „C” viz. obr. č. 31. Jednotlivé experimenty probíhaly na brzdovém zadní světle, které se skládá ze šesti LED diod: Advanced Power TOPLED typu LA G6SP od firmy OSRAM. Vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce č. 3. Podrobnější informace nalezne v dokumentu na příloženém CD.

Tabulka 3: Parametry LED - LA G6SP.

Technologie	InGaAlP Thinfilm
Pozorovací úhel na 50 % IV	120° (Lambertian Emitter)
Barva	červená (623 nm)
Optická účinnost	56 lm/W
Provozní teplota	-40 °C až 110 °C
Max. nárazový proud	1000 mA
Max. proud	140 mA
Typické napětí	2,1 V

Pro co nejvíce efektivní využití přijímaného signálu se nainstalovala na fotodetektor plan-convexní čočka, která mění vstupující svazek na sbíhavý, takže paprsky se za ní protínají v bodě označovaném jako ohnisko. Popis čočky naleznete v kapitole č. 7.1.6. Tato čočka se použila pouze v případě brzdového světla. V zapojení se stropním světlem nebyla použita, protože by

nám měřenou vzdálenost zkrátala z jednotek metrů na jednotky centimetrů (fotodetektor by musel být umístěn přímo pod stropní světlo).



Obrázek 30: Stropní světlo Fortimo LED DLM 3000 44W/840 Gen3.



Obrázek 31: Zadní světlo ŠKODA Octavia III.

### 7.1.2 Vývojové prostředí LabVIEW

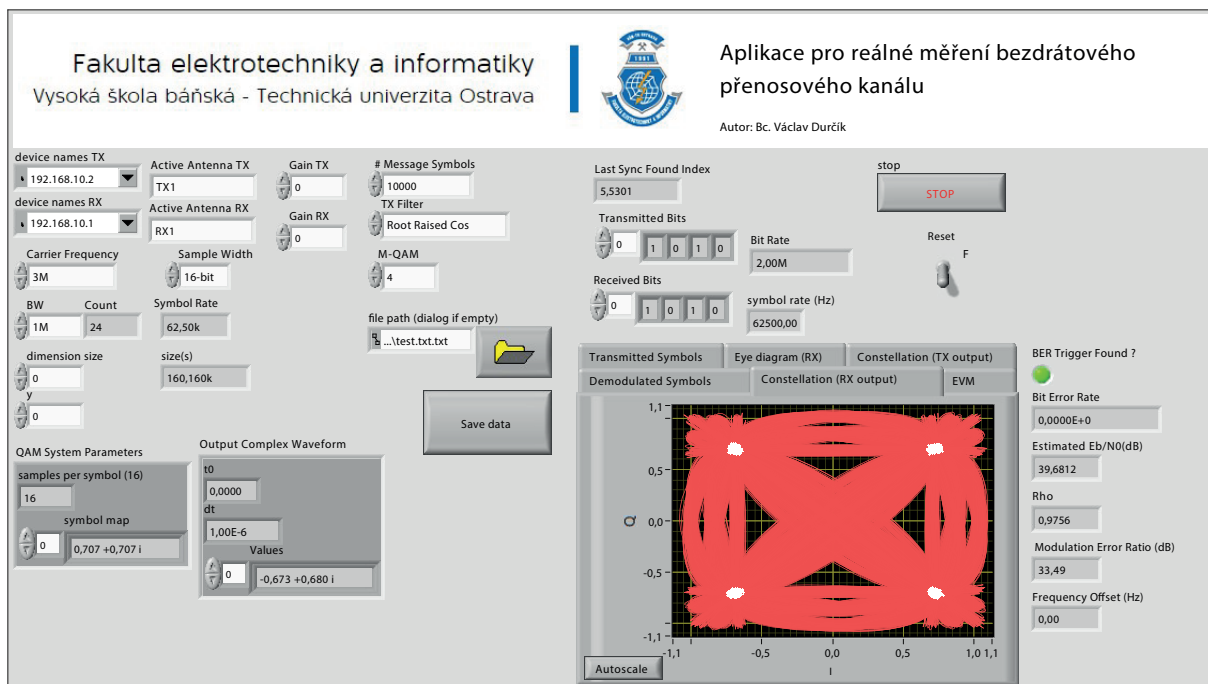
Všechny vytvořené aplikace pro reálné měření i pro simulace jsou vytvořeny v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW od americké firmy National Instruments. Používá se zde termín virtuální instrumentace, kdy hlavním cílem je dočasně nahradit nebo trvale nahradit technické prostředky (fyzický hardware) programovými prostředky nebo-li softwarem. Toto umožňuje rychlé navrhování nových aplikací a provádění jakýchkoliv úprav v konfiguraci, což je u reálného hardwaru často velmi nákladné. Lze tedy navrženou aplikaci odsimulovat a posléze napojit na skutečné nástroje (hardware).

### 7.1.3 Aplikace pro měření

Pro reálné měření byla vytvořena aplikace v prostředí LabVIEW. Aplikace umožňuje modulaci / demodulaci M-QAM, měření BER, nastavování šířky pásma, nastavování nosné frekvence, apod.) a zahrnuje propojení se zařízením USRP. Dále aplikace umožňuje zobrazit konstelační a eye diagramy. Ukázku čelního panelu aplikace pro reálné měření lze vidět na obrázku č. 32.

Aplikace umožňuje několik následujících nastavení např.:

- Nosná frekvence (Carrier Frequency) - max. 30 MHz
- Šířka pásma (BW)

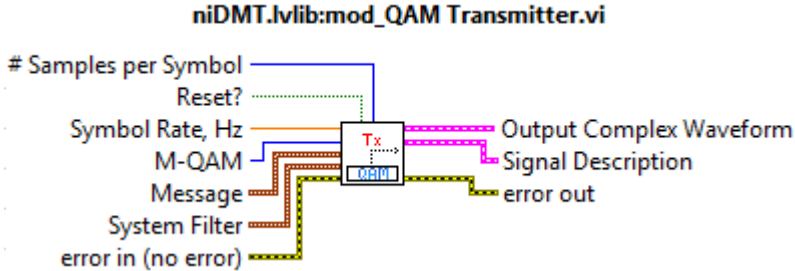
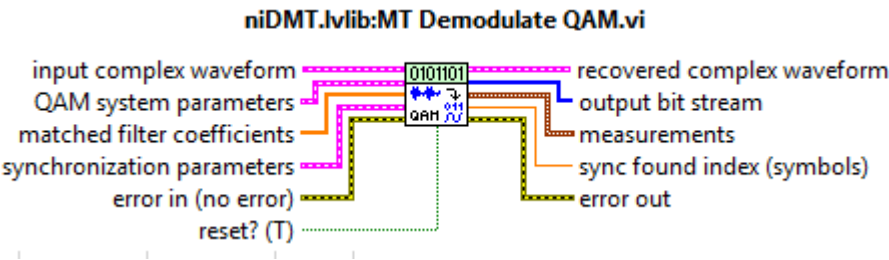
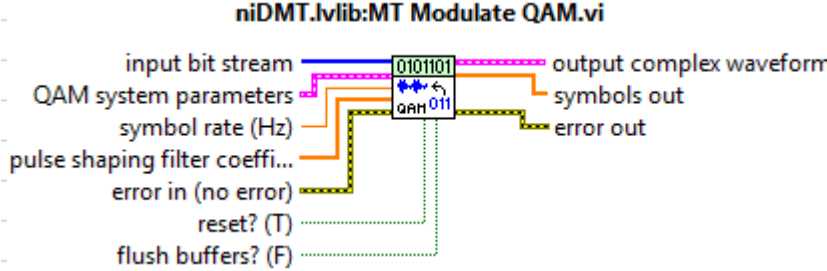


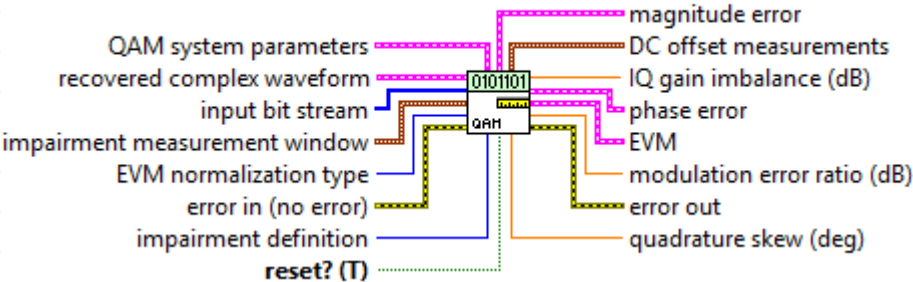
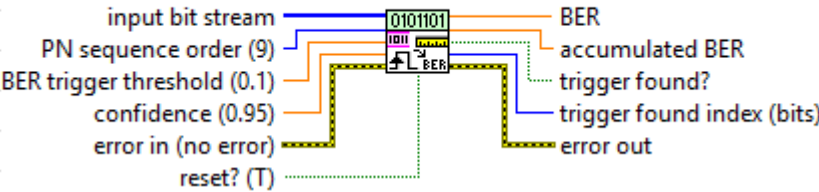
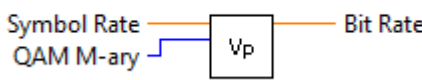
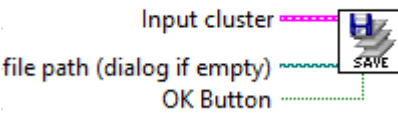
Obrázek 32: Ukázka čelního panelu aplikace pro reálné měření.

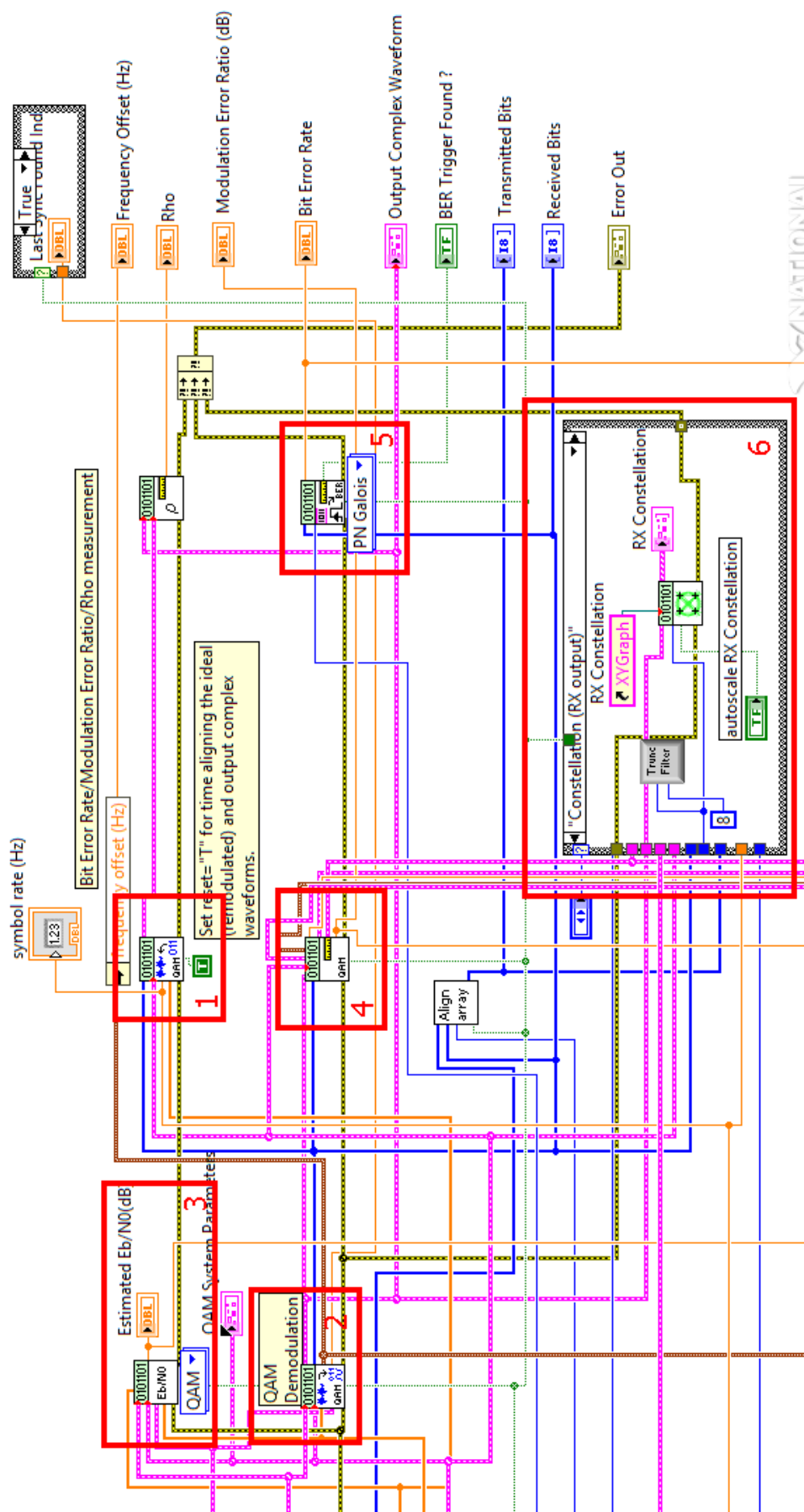
- Šířka vzorku (Sample Width) - max. 16 bitů
- QAM modulace (M-QAM) - max. 4096-QAM
- Počet symbolů zprávy (Message Symbols)
- Tx filtry (TX filter) - Raised Cosine nebo Root Raised Cos
- Zisk Tx (Gain TX)
- Zisk Rx (Gain RX)
- IP adresa TX zařízení (device names TX)
- IP adresa RX zařízení (device names RX)

Vytvořená aplikace umožňuje měření několika parametrů: BER, EVM, MER,  $E_b/N_0$ , fázovou chybu nebo vypočítat přenosovou rychlost na základě šířky pásma a počtu stavů modulace. V následující tabulce č. 4 jsou popsány vybrané funkce použité v aplikaci. Ukázka části zdrojového kódu v obrázku č. 33. Kde můžeme vidět vyznačené bloky pro modulaci signálu (blok č. 1), demulaci signálu (blok č. 2), měření  $E_b/N_0$  (blok č. 3), měření BER (blok č. 5), zobrazení konstelační diagramu (blok č. 6) a měření EVM, MER (blok č. 4) apod. Ostatní části kódu jsou umístěny v příloze na CD.

Tabulka 4: Vybrané funkce použité v aplikaci pro reálné měření přenosového kanálu.

	<p>Blok umožňující generovat signál QAM modulace. Lze nastavit PN sekvenci, ochranné bity, synchronizační bity, vysílací filtry, typ modulace, symbol rate, počet vzorků na symbol a vysílanou zprávu.</p>
	<p>Blok umožňující demodulovat signál QAM modulace na základě vstupních dat.</p>
	<p>Blok umožňující modulovat signál QAM modulací na základě vstupních dat.</p>

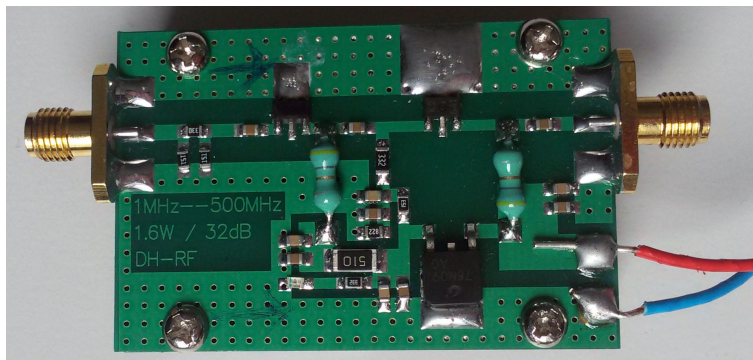
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Measure QAM Quadrature Impairments.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující na základě demodulovaného signálu vypočítat např. hodnoty MER, EVM, fázovou a amplitudovou chybu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Calculate BER.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující na základě vstupního bitového toku a PN sekvence vypočítat hodnotu BER.</p>
<p style="text-align: center;"><b>prenosova_rychlost_subVI.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující výpočet teoretické přenosové rychlosti na základě šířky pásma a počtu stavů modulace.</p>
<p style="text-align: center;"><b>save_subVI.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující ukládání hodnot všech měřených parametrů (BER, EVM, MER, <math>E_b/N_0</math>).</p>



Obrázek 33: Ukázka části zdrojového kódu.

#### 7.1.4 Zesilovač

Pro zesílení výstupního signálu z USRP byl použit zesilovač, jehož zesílení činí 32 dB. Zesilovač je napájen 12 V a jeho frekvenční rozmezí je 1 MHz - 500 MHz. Reálný pohled je zobrazen na obrázku č. 34.



Obrázek 34: Zesilovač zapojený v měřící soustavě.

#### 7.1.5 Fotodetektor

Pro detekci optického signálu byl použit fotodetektor PDA36A-EC od firmy Thorlabs. Jedná se o Si PIN fotodetektor a je možné regulovat jeho zisk do 80 dB. Vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce č. 5 a reálný pohled naleznete na obrázku 35. Úplná dokumentace fotodetektoru je uvedena v příloze na CD.

Tabulka 5: Vybrané parametry fotodetektoru PDA36A-EC.

Typ detektoru	Si PIN
Aktivní plocha	3.6x3.6 mm (13 mm <sup>2</sup> )
Rozsah vlnových délek	350-1100 nm
Maximální zisk	70 dB
Kroky zisku	8x10 dB
Pracovní teplota	0 až 40 °C
Maximální výstupní proud	100 mA

#### 7.1.6 Plankonvexní čočka

V případě zapojení s zadním brzdovým světlem byla použita plankonvexní čočka spojitého charakteru, kde optické paprsky pro průchodu čočkou se sbíhají do jednoho bodu tzv. ohniska. Jednalo plankonvexní čočku LA1252-A od firmy ThorLabs. Přední část čočky je vypuklá a zadní část je rovinná. Přímou aplikaci čočky lze vidět na obrázku č. 35 a vybrané parametry v tabulce č. 6.

Tabulka 6: Vybrané parametry plankonvexní čočky LA1252-A.

Průměr	Ohnisková vzdálenost	Dioptrie	Poloměr zakřivení	Rozsah vlnových délek
25 mm	25,4 mm	+39,4	13,1 mm	350 - 700 nm



Obrázek 35: Plankonvexní čočka aplikovaná na fotodetektoru.

#### 7.1.7 Bias-Tee ZX85-12G

V našem zapojení byl použit součtový člen Bias-Tee ZX85-12G. Jeho funkce je součet stejnosměrného signálu ze zdroje (DC) s radiofrekvenčním signálem (RF) vystupující z USRP. Výsledkem je výstup RF+DC a díky této funkci bude kmitat výstupní signál z USRP kmitat okolo stejnosměrného signálu vycházejícího ze zdroje. To nám umožní modulovat část optického výkonu. V případě, že byl se moduloval celý optický výkon, tak by docházelo k poklesu intenzity světla. Vybrané parametry Bias-Tee naleznete v tabulce č. 7.

Tabulka 7: Vybrané parametry Bias-Tee ZX85-12G.

Výrobce	Mini Circuits
Frekvence	0.2 MHz až 12 GHz
Maximální proud	0,4 A
Vložný útlum	0,6 dB
Maximální vstupní napětí	25 V
Impedance	50 $\Omega$
Konektor	SMA
Rozměry	1,88 x 1,9 x 1,17 cm





Obrázek 36: Bias-Tee ZX85-12G.

### 7.1.8 USRP

Zařízení USRP umožňují skutečně realizovat navrženou aplikaci pomocí LabVIEW v praxi např. FM rádio, RF záznam a přehrávání, pasivní radar a simulaci GPS. Existují různé druhy a to podle způsobu použití. V našem případě byly použity dvě zařízení NI USRP-2921 pro vysílání a přijímání signálu. Tato zařízení jsou pomocí ethernetového kabelu propojeny k počítači a jsou zároveň synchronizovány pomocí speciálního MIMO kabelu. Každé zařízení má jednotlivé vstupy/výstupy (SMA konektor) pro vysílání/přijímání signálu. Výrobce udává maximální šířku pásma 20 MHz a frekvenční rozmezí je 2,4 GHz - 2,5 GHz a 4,9 GHz - 5,9 GHz. Pro naše použití byly v USRP vyměněny karty, díky nim dokážeme měřit ve frekvenčním rozmezí 0-30 MHz. Jednalo se o karty: LFRX Daughterboard 0-30 MHz Rx a LFTX Daughterboard 0-30 MHz Tx. Další informace nalezne na přiloženém CD.



Obrázek 37: Zařízení USRP.

## 7.2 Realizace přenosového kanálu

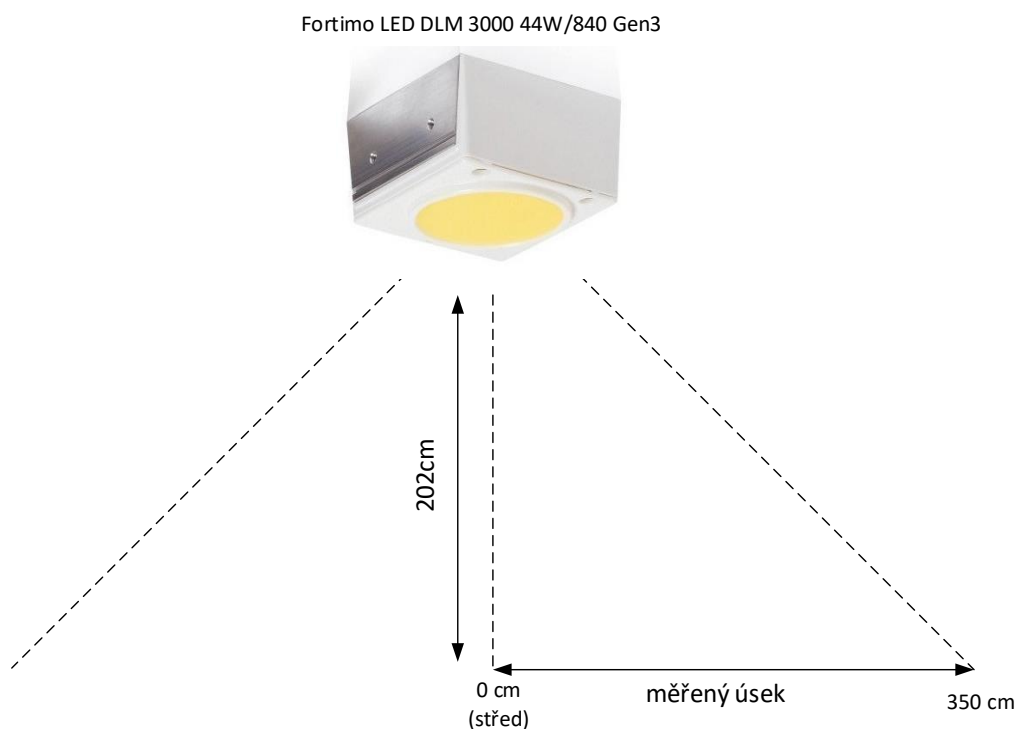
Měření přenosového kanálu probíhalo v různých zapojeních a podmínkách:

- měření na vnitřním stropním světle,
- měření na zadním brzdovém světle automobilu v různých podmínkách (mlha, déšť, tepelné turbulence).

Následujících kapitolách jsou popsány realizace a naměřené výsledky, které slouží jako zdroje dat pro modelování přenosového kanálu.

## 8 Měření na vnitřním stropním světle

Měření na vnitřním stropním světle probíhalo v laboratorních podmínkách, kde byla teplota ovzduší 24 stupňů celsia. Na obrázku č. 38 lze vidět návrh měření se stropním světlem. Dané stropní světlo má vyzařovací charakteristiku kuželového charakteru, a proto se proměřoval jeho poloměr. Měřená vzdálenost byla 350 cm od středu. Středem se myslí počátek našeho měření tzn. fotodetektor byl umístěn přímo pod světlo. Vzdálenost mezi světlem a fotodetektozem byla 202 cm, což přibližně odpovídá umístění fotodetektoru v úrovni běžné výšky stolu při výšce stropu 3 metry.

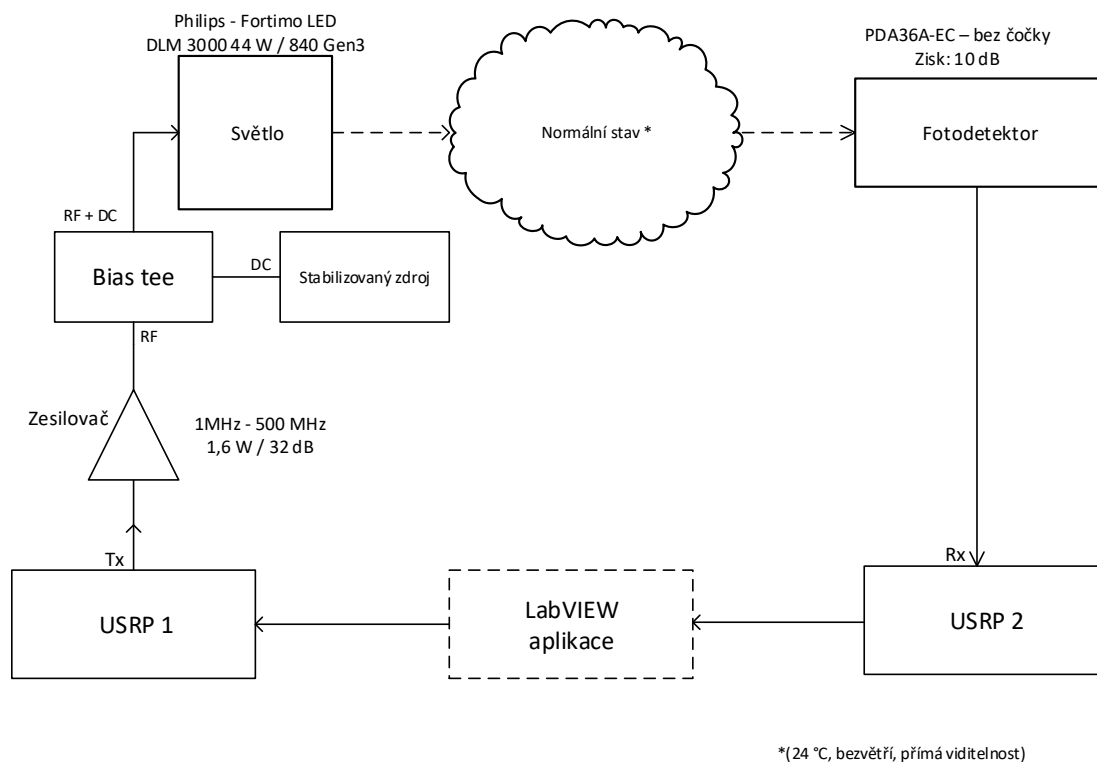


Obrázek 38: Návrh měření se stropním světlem.

### 8.1 Schéma zapojení se stropním světlem

Na obrázku č. 39 lze vidět schéma zapojení se stropním světlem. Základem je vytvořená aplikace v LabVIEW, kde se nastavují parametry pro vysílání a přijímání (např. typ modulace, šířka pásma, nosná frekvence). Výstup z aplikace jde přímo na USRP 1, které představuje náš fyzický vysílač. Dále je RF signál vycházející z USRP 1 zesílen výkonovým zesilovačem a pak je přiveden do součtového členu Bias tee, jehož výstupem je součet stejnosměrného signálu a RF signálu (RF+DC). Tento výstup je pak přiveden na světlo. Mezi světlem a fotodetektozem je volný prostor (24°C, bezvětrí, přímá viditelnost). Na přijímací straně je umístěn fotodetektor, jehož

výstupní signál jde ke zpracování do USRP 2 a pak do aplikace v LabVIEW, kde probíhá měření.



Obrázek 39: Schéma zapojení se stropním světlem.

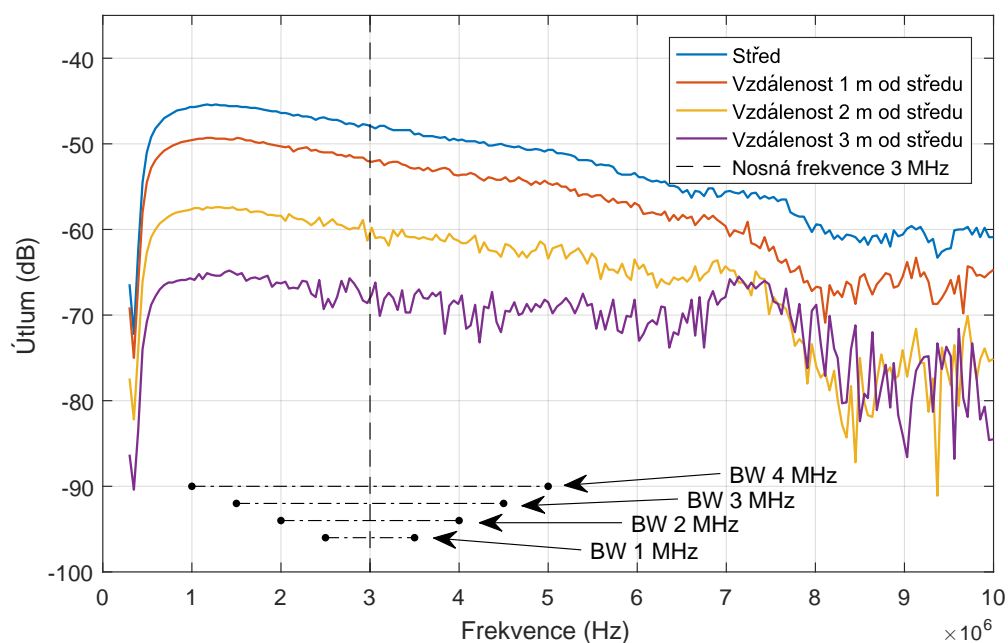
## 8.2 Nastavení měřicího systému pro stropní světlo

Nastavení měřicího systému pro stropní světlo:

- Nosná frekvence: 3 MHz
- Šířka pásma: 1 - 4 MHz
- Typ modulace: M-QAM
- Zisk Tx,Rx: 0 dB
- Message symbols: 10 000
- Tx filter: Root raised cos
- Sample width: 16-bit

- Vzdálenost fotodetektor - stropní světlo: 202 cm
- Měřená vzdálenost: 0-350 cm
- Použití fotodetektoru bez přídavné plankonvexní čočky = větší dosažitelná vzdálenost
- Měřené parametry:  $E_b/N_0$ , BER, EVM, MER

Před měřením byly změřeny frekvenční útlumové charakteristiky komunikačního řetězce se stropním světlem pomocí vektorového síťového analyzátoru (VNA), které lze vidět na obrázku č. 40. Z obrázku je patrné, že s rostoucí vzdáleností nám roste útlum. Ve středu měření (fotodetektor přímo pod světlem) je nárůst útlumu o 47 dB vůči referenci. Ve vzdálenosti 3 m je nárůst útlumu o 68 dB, což nám negativně ovlivňuje komunikaci. Nosná frekvence 3 MHz byla zvolena, tak aby se dala navyšovat šířka pásma. Jelikož nám s rostoucí frekvencí narůstá útlum vůči referenci, tak s větší šířkou pásma nám roste hodnota útlumu rozdílu mezi nejvyšší a nejnižší frekvencí přenášeného signálu. To má za následek výpadek některých modulací nebo úplný rozpad komunikace u všech modulací. V případě volby  $BW = 4$  MHz, tak to znamená, že od nosné frekvence jsou 2 MHz na každou stranu ( $\pm 2$  MHz).

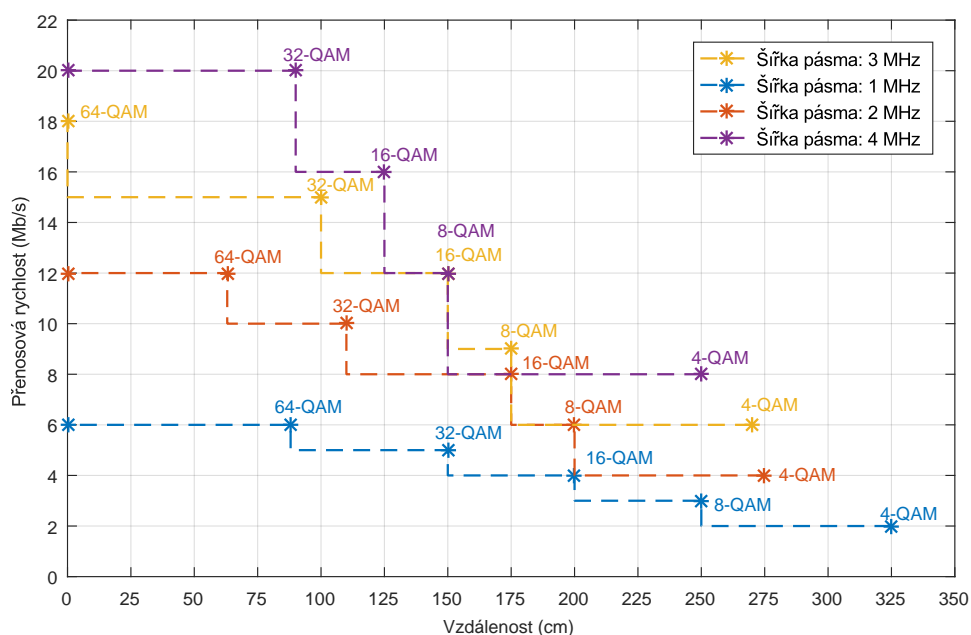


Obrázek 40: Frekvenční útlumová charakteristika komunikačního řetězce se stropním světlem.

### 8.3 Zpracování a analýza výsledků

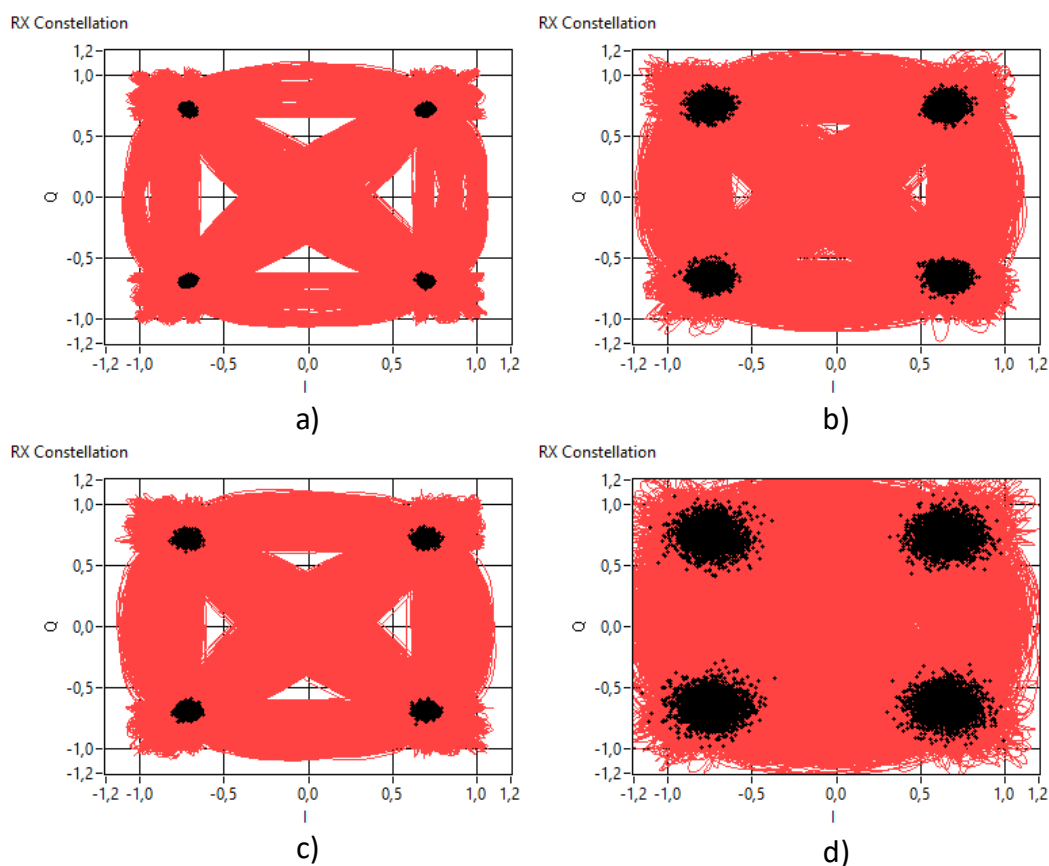
Výsledná teoretická přenosová rychlost se nám odvíjela od toho jaká byla použita modulace, šířka pásma a vzdálenost fotodetektoru od středu měření. Při největší naměřené vzdálenosti

325 cm byla dosažena teoretická přenosová rychlost 2 Mb/s při šířce pásma 1 MHz a modulaci 4-QAM. Největší teoretická přenosová rychlost 20 Mb/s byla naměřena do vzdálenosti 90 cm od středu a to při použití modulace 32-QAM a šířce pásma 4 MHz. Výsledky teoretických přenosových rychlostí lze vidět na obrázku č. 41. Při realizaci takové komunikace do skutečného provozu se nabízí využití adaptivních modulací, které mění počet stavů M-QAM modulace na základě stavu komunikačního kanálu. V našem případě by to znamenalo, že s rostoucí vzdáleností od fotodetektoru by se snižoval počet stavů M-QAM a s klesající vzdáleností by narůstal počet stavů M-QAM.



Obrázek 41: Závislost teoretické přenosové rychlosti na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s různými šířkami pásma.

Porovnání konstelační diagramů 4-QAM pro různé vzdálenosti a šířky pásma 1 a 4 MHz lze vidět na obrázku 42. Můžeme si všimnout, že konstelační body u šířky pásma 4 MHz jsou více roztažené od středu (od své ideální podoby). Ačkoli pro všechny diagramy byla naměřena hodnota  $BER < 10E-06$ , tak při vyšší modulaci (např. 8-QAM, 16-QAM, ...) by takové roztažení mělo za důsledek vzrůst bitové chybovosti nebo úplný rozpad komunikace. Více konstelační diagramů lze nalézt na příloženém CD.



Obrázek 42: Konstelační diagramy 4-QAM u stropního světla při šířce pásma 1 a 4 MHz a různých vzdálenost - a) 4-QAM, BW = 1 MHz, vzdálenost 0 cm; b) 4-QAM, BW = 1 MHz, vzdálenost 200 cm; c) 4-QAM, BW = 4 MHz, vzdálenost 0 cm; b) 4-QAM, BW = 4 MHz, vzdálenost 200 cm .

Na obrázku 43 lze vidět porovnání parametru BER při různých šířkách pásma a modulace M-QAM. V grafu jsou zobrazeny maximální dosažené vzdálenosti jednotlivých modulací při různých šířkách pásma, pro které byly zaznamenány hodnoty BER. Zároveň byla vyznačena hodnota FEC limitu<sup>1</sup> Obecně lze říci, že měřitelná bitová chybovost byla ve větších vzdálenostech mezi fotodetektorem a světlem. Jednalo se většinou o 2-3 poslední vzdálenosti z celkové měřené, kdy značně rostla bitová chybovost.

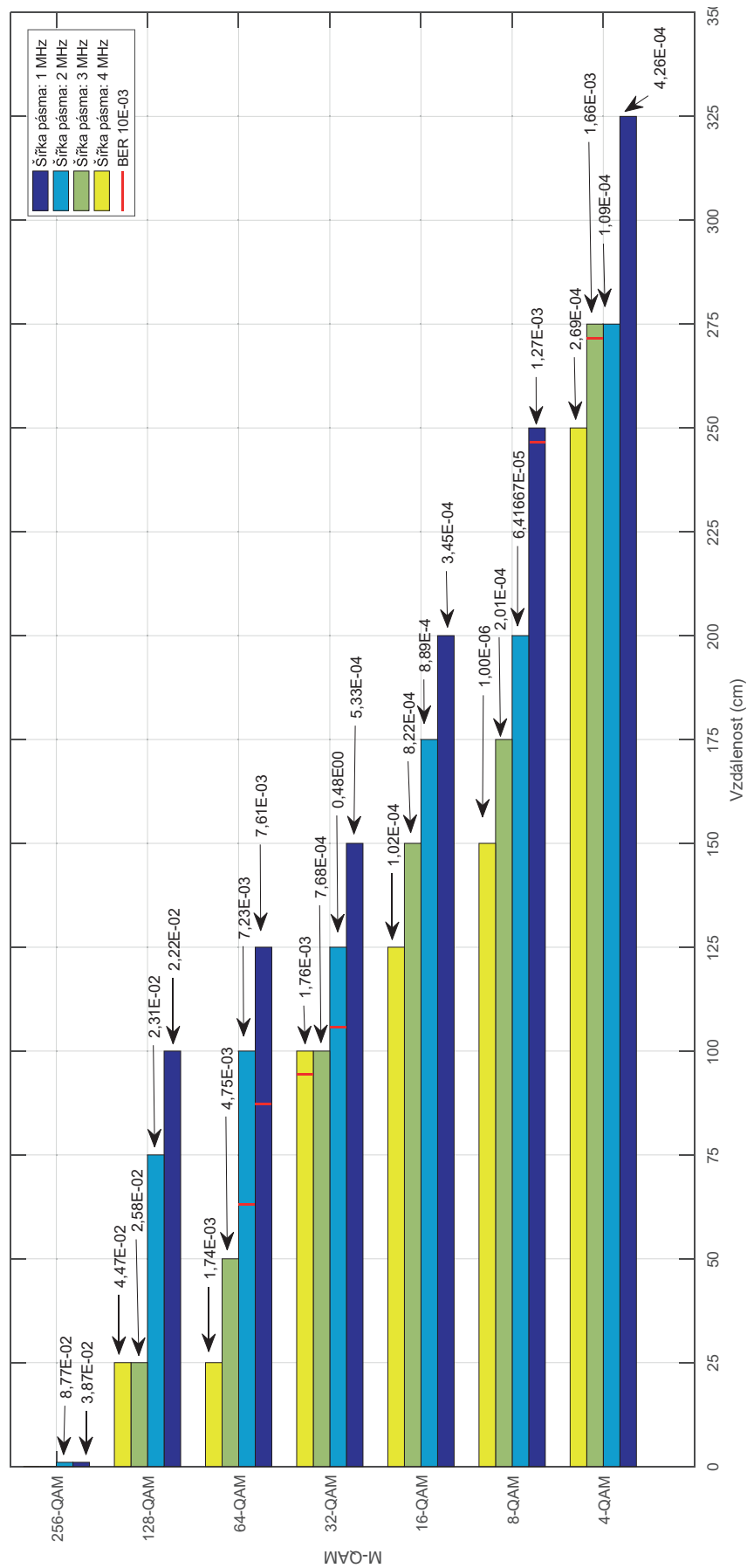
Následující obrázky č. 44 - 45 ukazují porovnání dvou šířek pásma 1 MHz a 4 MHz tzn. nejmenší a největší měřené. Z grafů vyplývá, že s rostoucí vzdáleností klesá hodnota  $E_b/N_0$  a roste EVM. Dále s větší šířkou pásma klesá dosažitelná vzdálenost od středu. Obecně lze říci, že s vyššími šířkami pásma roste přenosová rychlost, ale klesá dosažitelná vzdálenost. V grafu č.

<sup>1</sup>FEC limit označuje max. hodnotu BER, při které jsou samoopravné kódy schopny opravit chyby vzniklých při přenosu. Hodnota max. bitové chybovosti je  $10E-03$ .

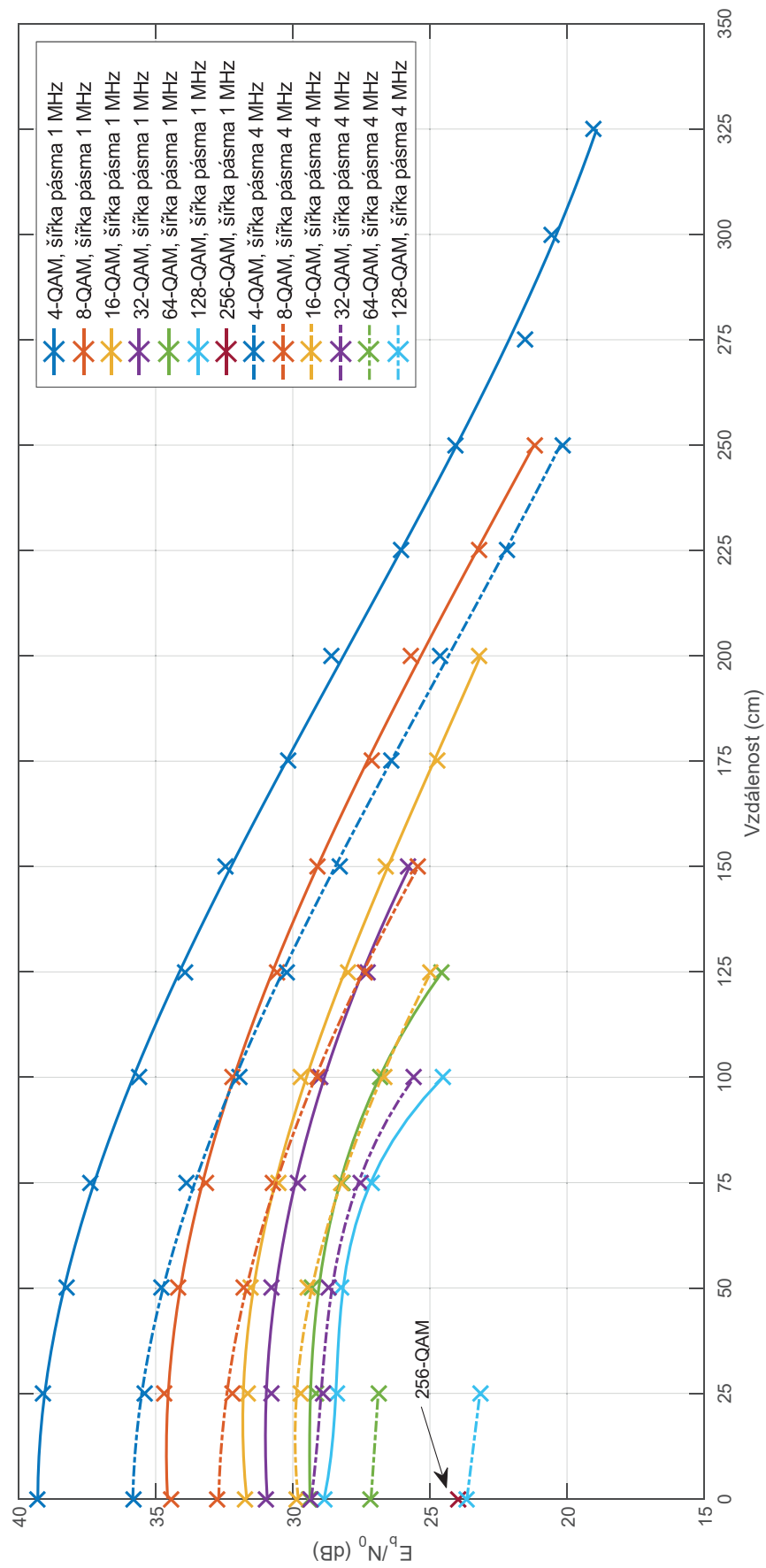
44 si můžeme všimnout, že hodnoty odstupů signálu od šumu jsou nižší pro šířku pásma 1 MHz než pro BW 4 MHz. Je to dáno tím, že vyšší šířky pásma je náchylnější na rušení. U parametru EVM je situace podobná s tím, že hodnoty parametru rostou se vzdáleností.

Jednotlivé grafy pro šířky pásma 1-4 MHz jsou pak zobrazeny v příloze na CD. Tabulky naměřených hodnot pro šířku pásma 1 MHz lze nalézt v příloze B, zbylé tabulky jsou umístěny v příloze na CD.

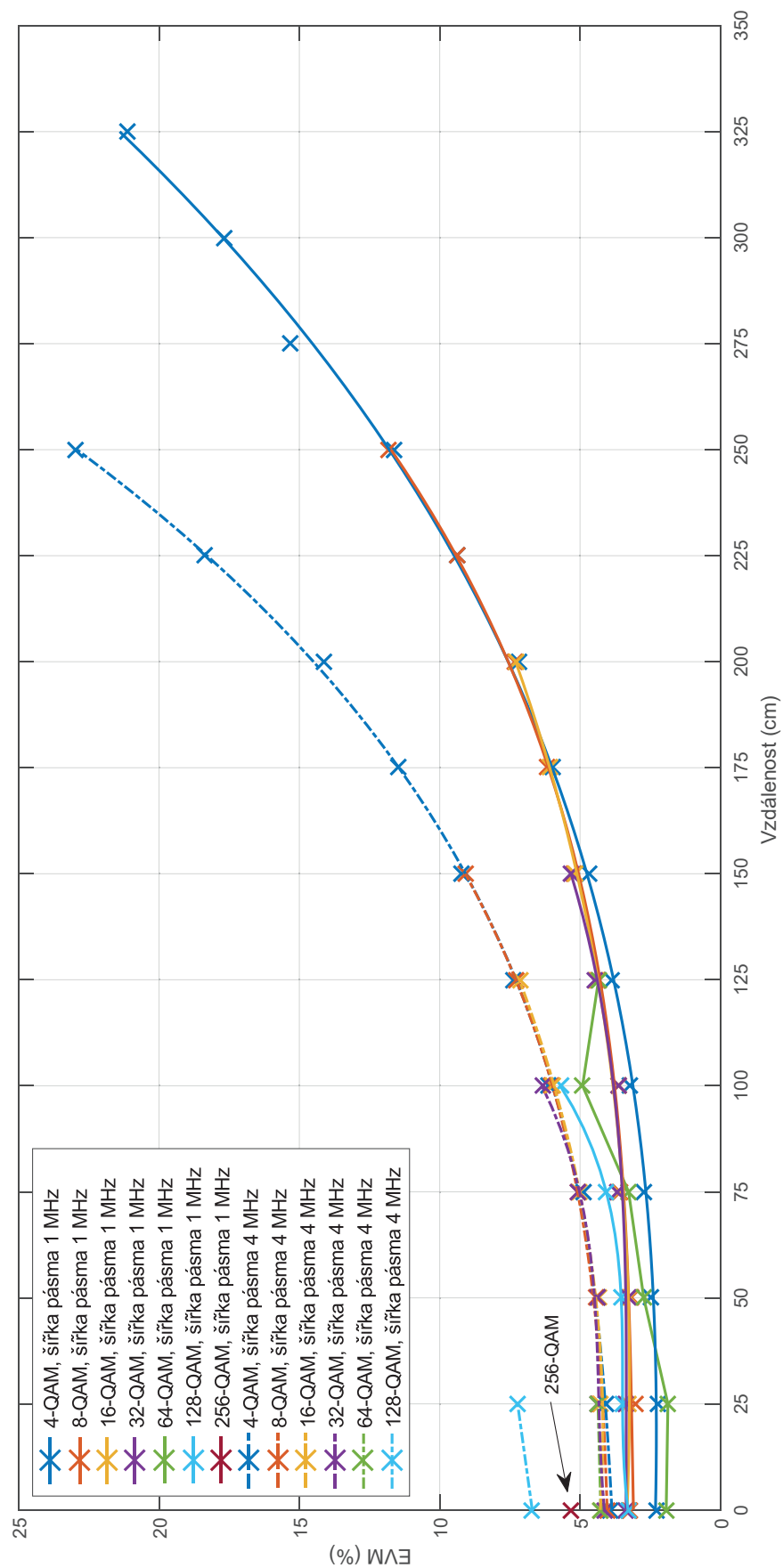




Obrázek 43: Závislost bitové chybovosti na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s různými šířkami pásma.



Obrázek 44: Závislost  $E_b/N_0$  na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz.



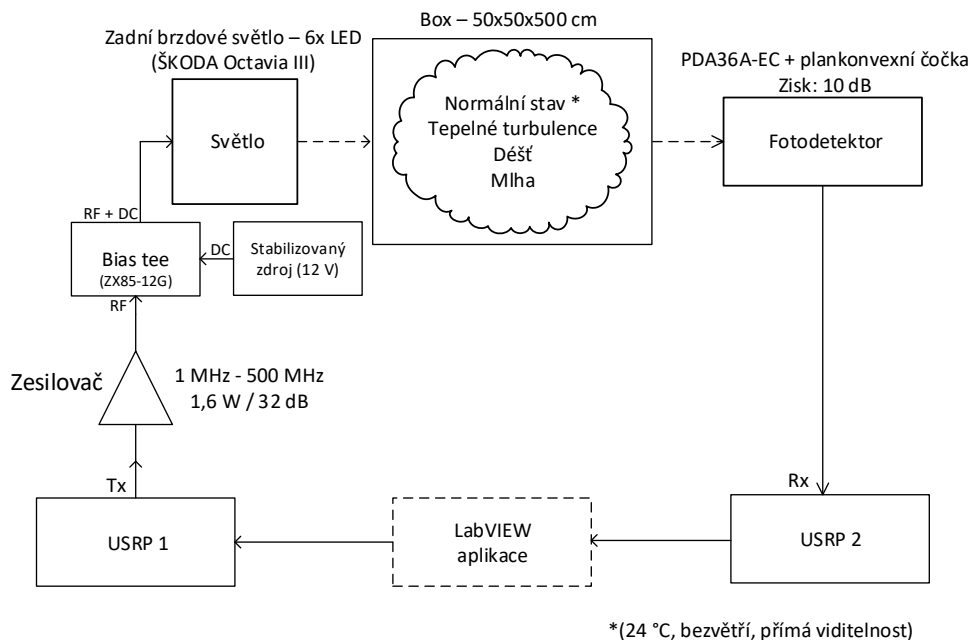
Obrázek 45: Závislost EVM na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz.

## 9 Měření na zadním brzdovém světle automobilu

Měření na zadním brzdovém světle automobilu probíhalo v různých meteorologických podmínkách. Tyto podmínky byly simulovány v boxu o rozměrech 50x50x500 cm. Box byl vyroben čirého plexiskla. Celková měřená vzdálenost byla 550 cm. Nejprve byl proměřen prázdný box a naměřené hodnoty slouží jako reference pro ostatní měření. Poté probíhalo měření boxu s mlhou, tepelnými turbulencemi a deštěm. Jednotlivé návrhy měření pro různé meteorologické podmínky jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

### 9.1 Schéma zapojení se zadním brzdovým světlem automobilu

Na obrázku č. 46 lze vidět schéma zapojení se zadním brzdovým světlem automobilu. Základem je vytvořená aplikace v LabVIEW, kde se nastavují parametry pro vysílání a přijímání (např. typ modulace, šířka pásma, nosná frekvence). Výstup z aplikace jde přímo na USRP 1, které představuje náš fyzický vysílač. Dále je RF signál vycházející z USRP 1 zesílen výkonovým zesilovačem a pak je přiveden do součtového členu Bias tee, jehož výstupem je součet stejnosměrného signálu a RF signálu (RF+DC). Tento výstup je pak přiveden na světlo. Mezi světlem a fotodetektem je volný prostor (24°C, bezvětrí, přímá viditelnost). Na přijímací straně je umístěn fotodetektor, jehož výstupní signál jde ke zpracování do USRP 2 a pak do aplikace v LabVIEW, kde probíhá měření.



Obrázek 46: Schéma zapojení se zadním brzdovým světlem automobilu.

## 9.2 Nastavení měřicího systému pro zadní brzdové světlo automobilu

Nastavení měřicího systému pro zadní brzdové světlo automobilu:

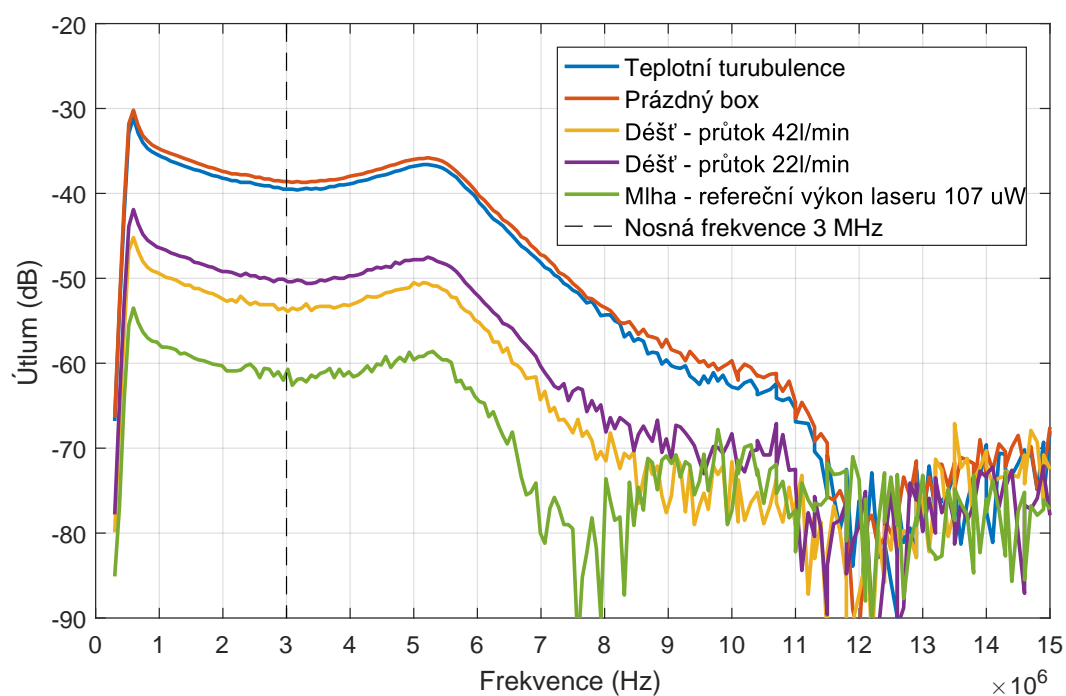
- Nosná frekvence: 3 MHz
- Šířka pásma: 1 - 4 MHz
- Typ modulace: M-QAM
- Zisk Tx,Rx: 0 dB
- Message symbols: 10 000
- Tx filter: Root raised cos
- Sample width: 16-bit
- Vzdálenost fotodetektor - zadní brzdové světlo: 550 cm
- Použití fotodetektoru s přidavnou plankonvexní čočkou = větší dosažitelná vzdálenost
- Měřené parametry:  $E_b/N_0$ , BER, EVM, MER

U každého měření byly změřeny frekvenční útlumové charakteristiky komunikačního řetězce se zadním brzdovým světlem automobilu pomocí vektorového síťového analyzátoru (VNA). Porovnání jednotlivých meteorologických podmínek lze vidět na obrázku č. 47. Z obrázku je patrné, že největší negativní vliv na komunikaci má mlha, pak následují deště a tepelné turbulence. U mlhy je uveden referenční výkon laseru, při kterém začala fungovat první modulace 4-QAM.

Následující tabulka č. 8 ukazuje nejvyšší přenosové rychlosti u různých meteorologických podmínek a šířek pásma. Jsou to hodnoty kolem bitové chybovosti  $10E-03$  a měřená vzdálenost odpovídala 550 cm. Největší teoretické přenosové rychlosti 32 Mb/s jsme dosáhli při prázdném boxu a tepelných turbulentích. U dešťů dosahovala teoretická přenosová rychlost maximálně 20 Mb/s. Mlha zde není uvedena, protože u ní nebyly stejné podmínky po dobu celého měření. Více informací naleznete v kapitole č. 9.7.

Tabulka 8: Nejvyšší přenosové rychlosti u různých meteorologických podmínek a šířek pásma.

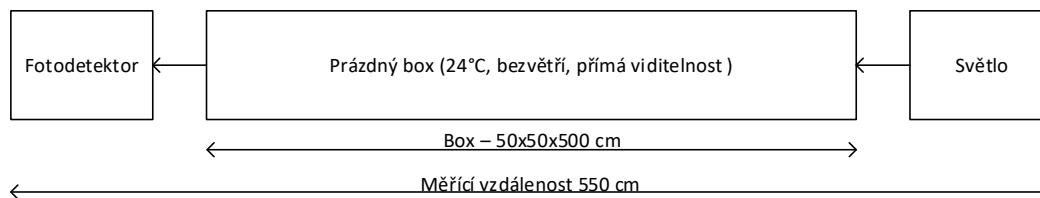
Šířka pásma	1 MHz	2 MHz	3 MHz	4 MHz
Prázdný box	256-QAM	256-QAM	256-QAM	256-QAM
Přenos. rychlost (Mb/s)	8	16	24	32
Tepelné turbulence	256-QAM	256-QAM	256-QAM	256-QAM
Přenos. rychlost (Mb/s)	8	16	24	32
Děšť - 22 l/min	64-QAM	64-QAM	64-QAM	32-QAM
Přenos. rychlost (Mb/s)	6	12	18	20
Děšť - 42 l/min	64-QAM	32-QAM	32-QAM	32-QAM
Přenos. rychlost (Mb/s)	6	10	15	20



Obrázek 47: Porovnání frekvenčních útlumových charakteristik komunikačního řetězce se zadním brzdovým světlem v různých meteorologických podmínkách.

### 9.3 Prázdný box

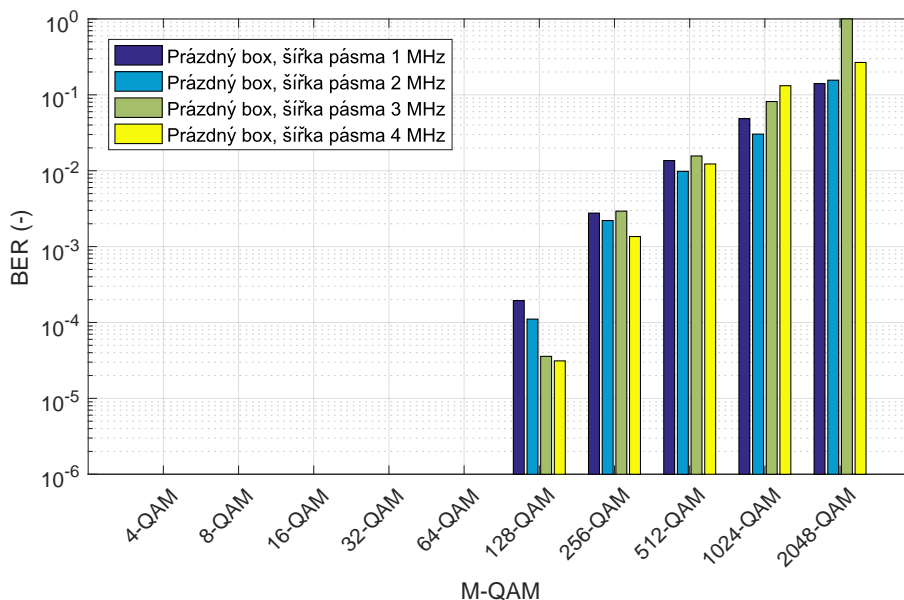
V první fázi se proměřoval uzavřený prázdný box a naměřené hodnoty slouží jako reference pro ostatní měření. Uvnitř boxu byly následující podmínky: teplota vzduchu: 24°C, bezvětrí, přímá viditelnost. Návrh měření lze vidět na obrázku č. 48.



Obrázek 48: Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro prázdný box.

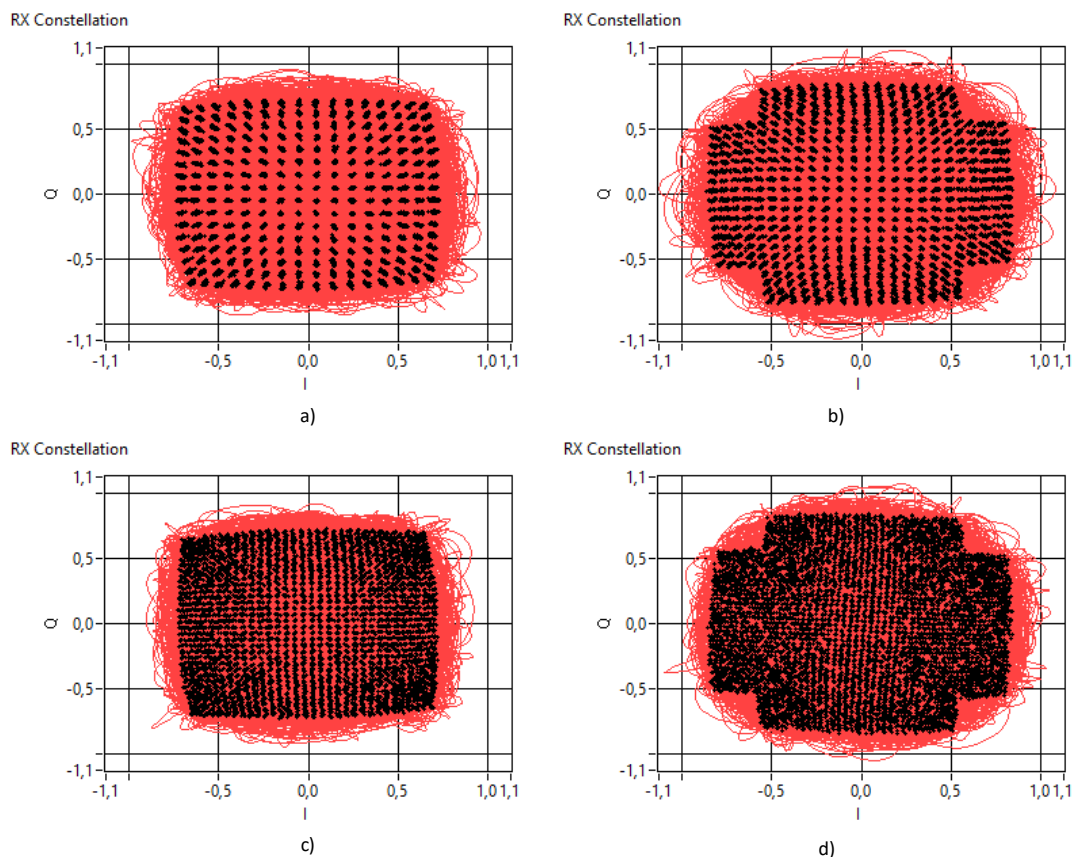
#### 9.3.1 Zpracování a analýza výsledků

Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz názorně uvedeno na obrázku č. 49. Můžeme si všimnout, že do modulace 64-QAM je hodnota BER menší než 10E-06 (neměřitelné BER). Naopak od 128-QAM nám roste bitová chybovost. Bitová chybovost u 512-QAM u všech šířek pásma je kolem 10E-02. Při takové chybovosti se komunikace rozpadá a žádný samoopravný kód není použitelný nebo-li nedokáže zrekonstruovat původní data.



Obrázek 49: Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - prázdný box.

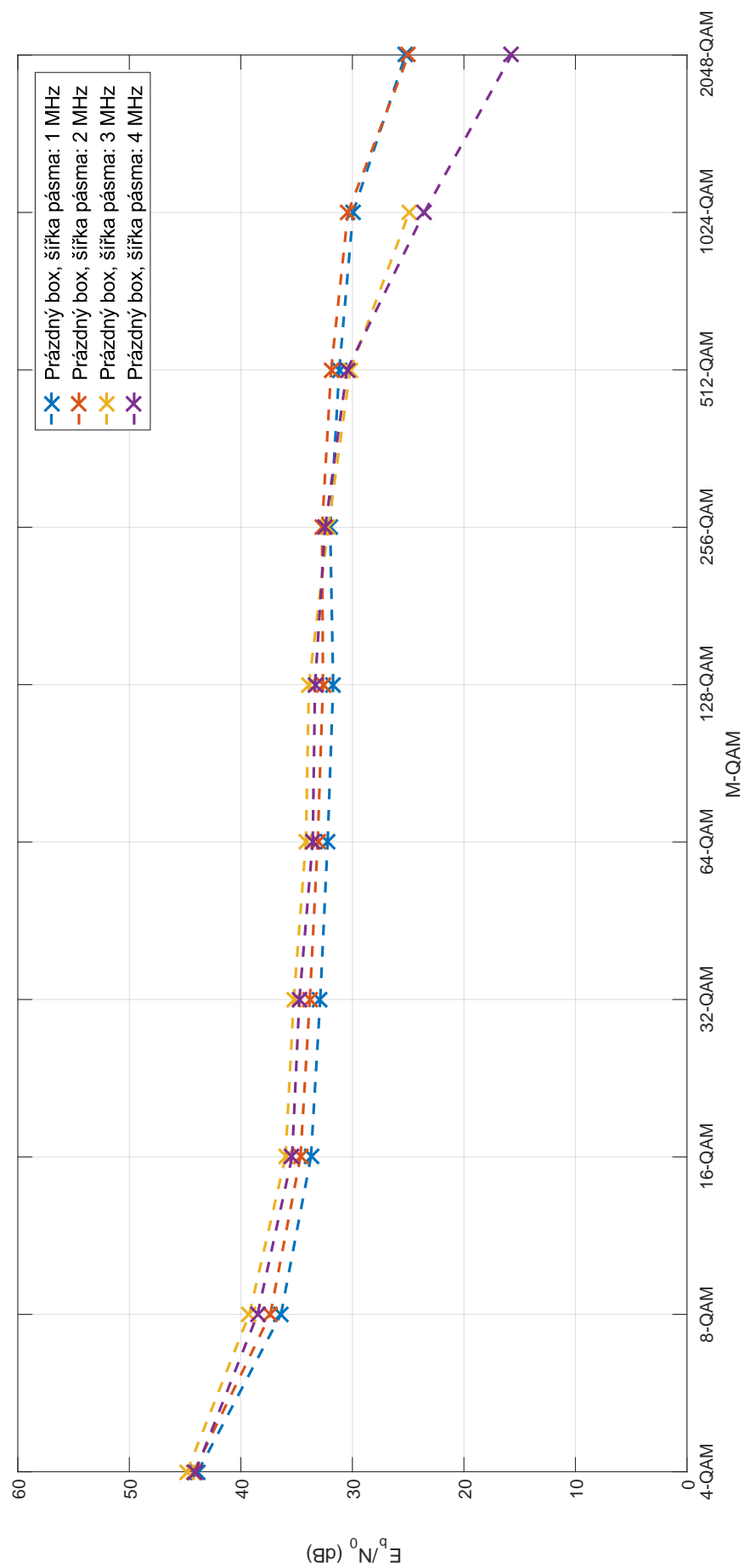
Porovnání konstelační diagramů při šířce pásma 1 MHz lze vidět na obrázku 50. Můžeme si všimnout, že u konstelačního diagramu modulace 256-QAM (část a)) lze rozeznat jednotlivé body konstelace. Bitová chybovost byla u této modulace řádově kolem  $10E-03$ . U maximální měřené modulace 2048-QAM (část b)) vidíme, že jednotlivé konstelační body se prolínají a bitová chybovost řádově kolem  $10E-01$ . Více konstelační diagramů lze nalézt na příloženém CD.



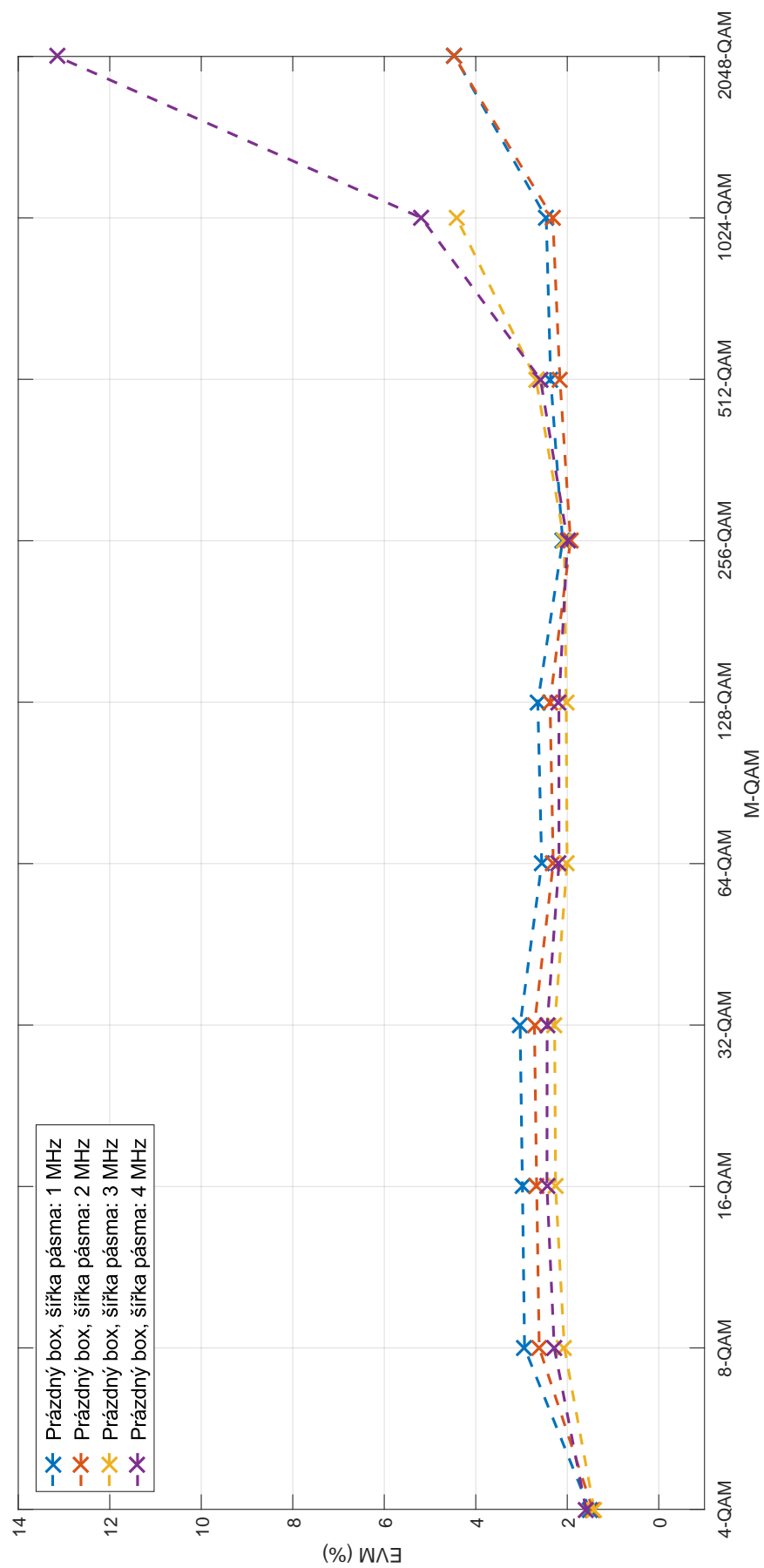
Obrázek 50: Konstelační diagramy u prázdného boxu a šířce pásma 1 MHz - a) 256-QAM, b) 512-QAM, c) 1024-QAM, d) 2048-QAM.

Na následujících grafech č. 51 - 52 lze vidět hodnoty  $E_b/N_0$  a EVM při daných modulacích a šířkách pásma. Můžeme si všimnout, že od modulace 256-QAM jsou výraznější rozdíly u daných šířek pásma. Ostatní grafy a tabulky s naměřenými hodnotami naleznete v příloze na CD.





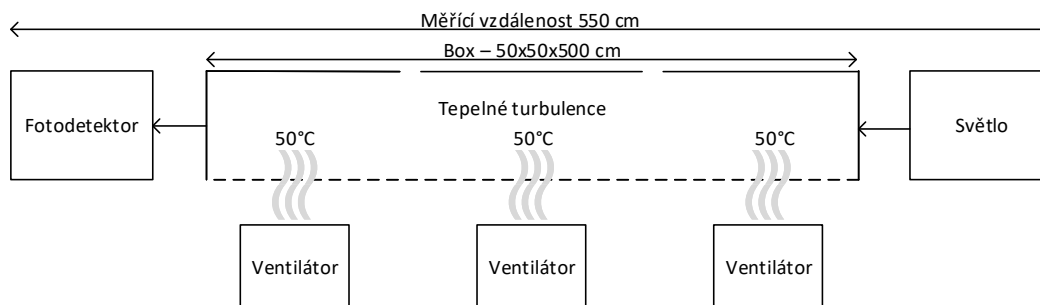
Obrázek 51: Parametr  $E_b/N_0$  jednotlivých M-QAM modulací u různých šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm - prázdný box.



Obrázek 52: Parametr EVM jednotlivých M-QAM modulací u různých šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm - prázdný box.

## 9.4 Tepelné turbulence

Pro měření se tepelnými turbulencemi byla u boxu odstraněna spodní stěna a pod box byly umístěny horkovzdušné ventilátory. Ve vrchní stěně byly dva otvory pro cirkulování vzduchu. Teplota vzduchu nad ventilátorem byla  $50^{\circ}\text{C}$  a mimo ventilátory byla teplota vzduchu  $44^{\circ}\text{C}$ . Horizontální proudění vzduchu bylo  $0,3\text{ m/s}$  a vertikální (nad horkovzdušným ventilátorem)  $2,5\text{ m/s}$ . Návrh měření lze vidět 53. Měření probíhalo až se teplota vzduchu uvnitř boxu ustálila.



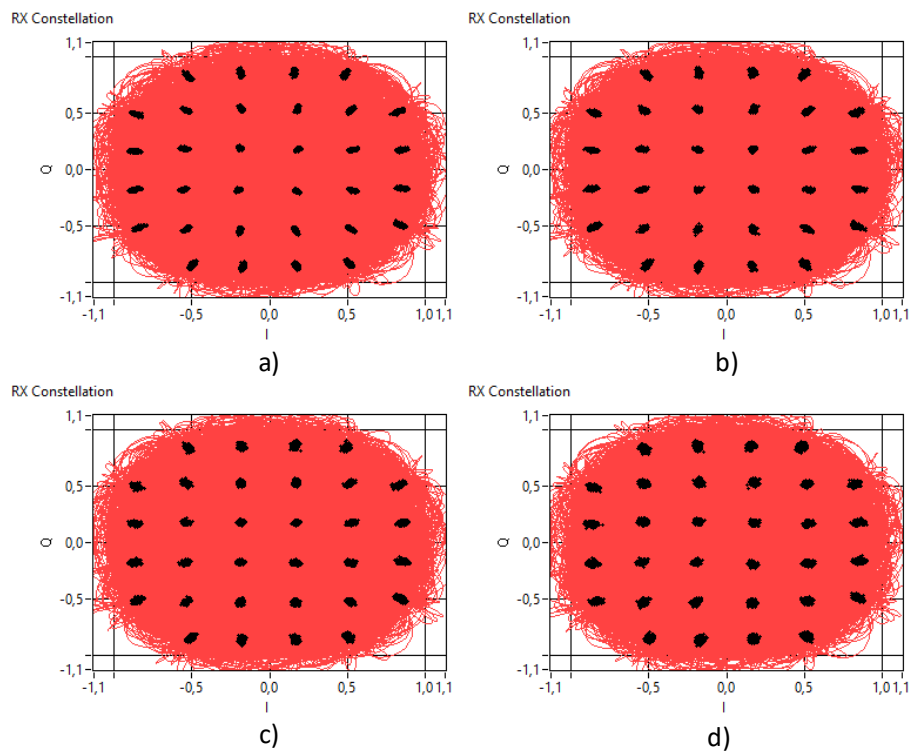
Obrázek 53: Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro tepelné turbulence.

### 9.4.1 Zpracování a analýza výsledků

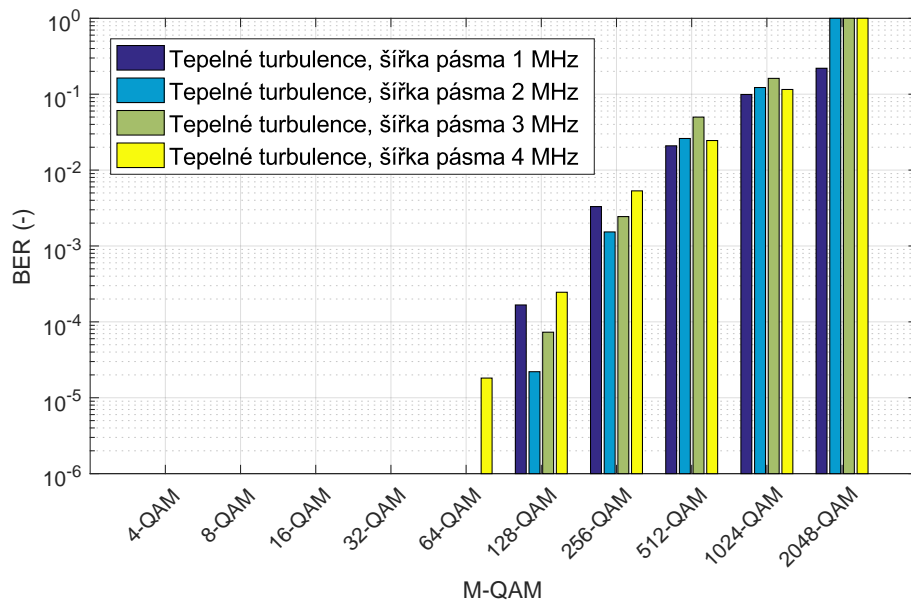
Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz názorně uvedeno na obrázku č. 55. Můžeme si všimnout, že do modulace 32-QAM je hodnota BER menší než  $10\text{E-}06$  (neměřitelné BER). Naopak od 64-QAM nám roste bitová chybovost.

Porovnání parametrů  $E_b/N_0$ , EVM u tepelných turbulencí a prázdného boxu lze vidět na následujících grafech č. 56 - 57. Na první pohled si můžeme všimnout poklesu hodnot  $E_b/N_0$  a nárustu EVM oproti referenci (prázdný box). Nejvýraznější změny nastávají od modulace 128-QAM. Můžeme si taky všimnout, že u tepelných turbulencí byla modulace 2048-QAM neměřitelná tzn. komunikace se rozpadla.

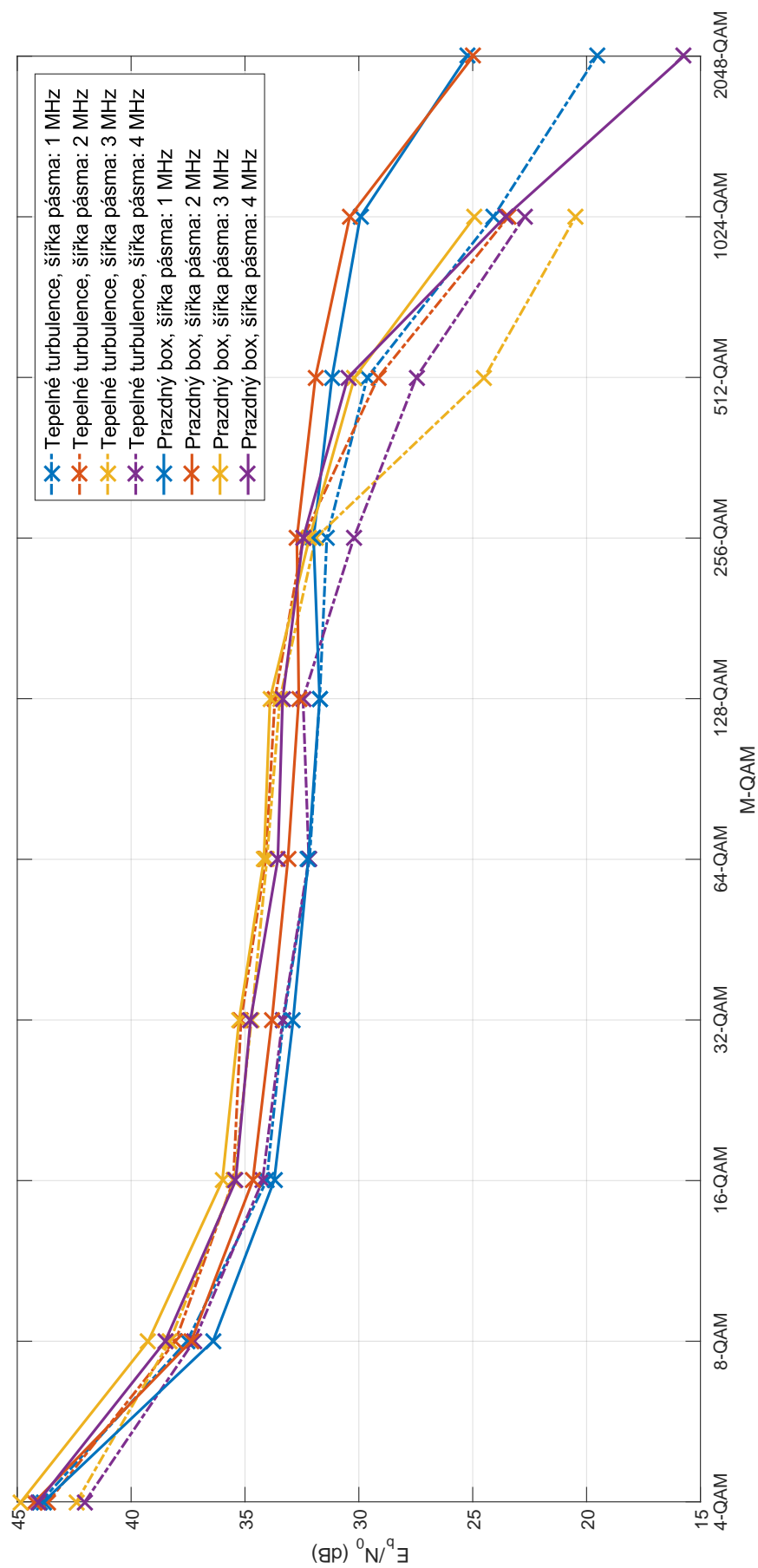
Porovnání konstelační diagramů 32-QAM pro různé šířky pásma 1 - 4 MHz lze vidět na obrázku 54. Můžeme si všimnout, že konstelační diagramy se opět mírně liší. Nejhorší stav je opět u šířky pásma 4 MHz. Ostatní grafy, konstelační diagramy a tabulky naměřených hodnot jsou umístěny v příloze na CD.



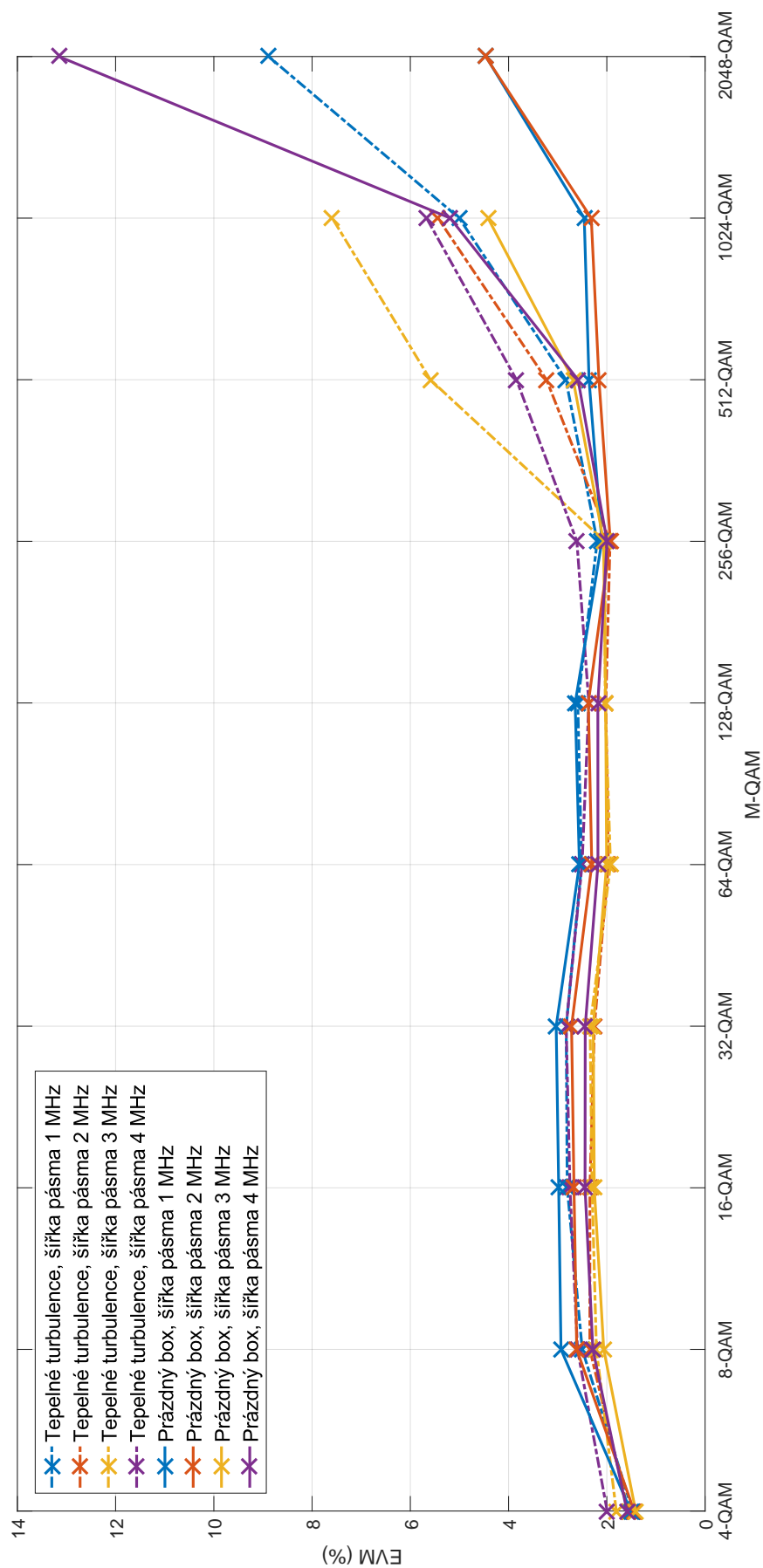
Obrázek 54: Konstelační diagramy 32-QAM u tepelných turbulencí a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz.



Obrázek 55: Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - tepelné turbulence.



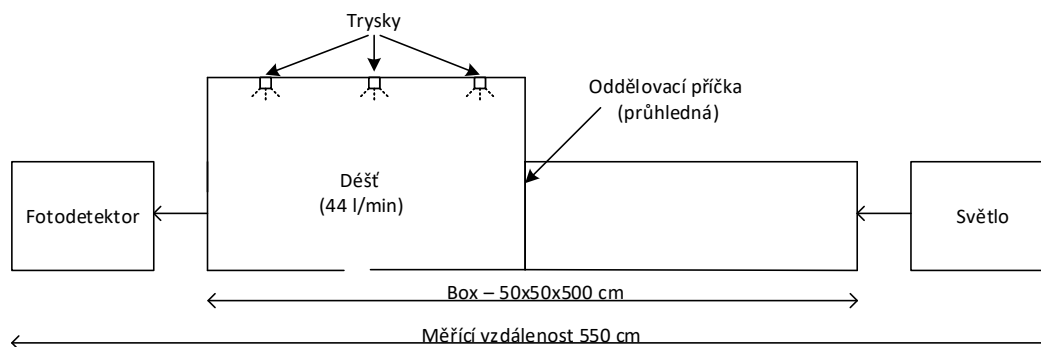
Obrázek 56: Porovnání parametru  $E_b/N_0$  jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u tepelných turbulence a prázdného boxu.



Obrázek 57: Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u tepelných turbulencí a prázdného boxu.

## 9.5 Déšť 42 l/min

Pro měření se deštěm byla u boxu odstraněna polovina vrchního dílu a nad tuto část boxu byla vložena konstrukce s třemi tryskami. Ve spodním dílu boxu byl otvor pro odtok vody a pod ním nádoba pro zachycení vody. Voda byla přiváděna do trysek pomocí kompresoru. Díky kompresoru a nádobě pod odtokem se vytvořil uzavřený okruh. Průtok vody byl nastaven na 42 l/min. Návrh měření lze vidět 58.



Obrázek 58: Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro déšť (42 l/min).

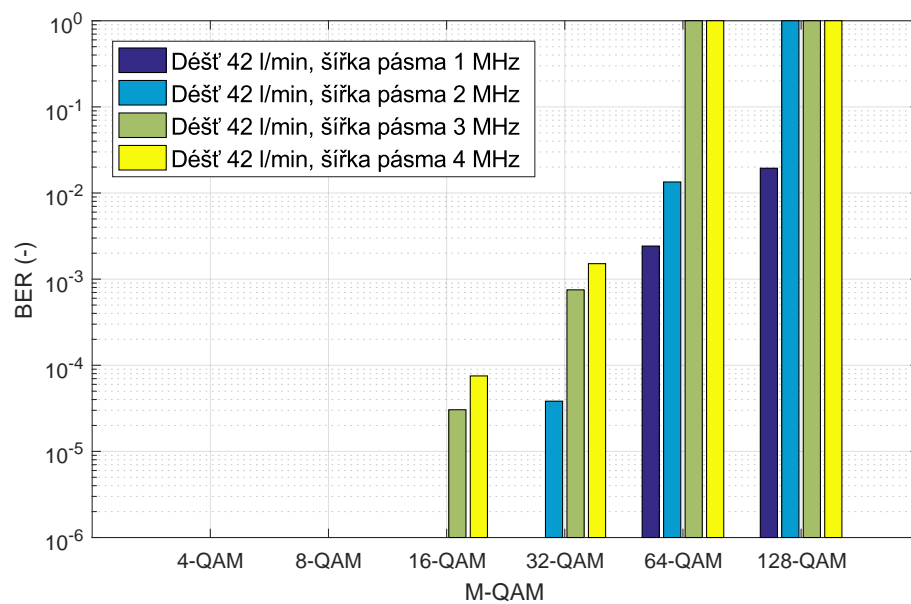
### 9.5.1 Zpracování a analýza výsledků

Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz názorně uvedeno na obrázku č. 59. Můžeme si všimnout, že do modulační 8-QAM je hodnota BER menší než  $10E-06$  (neměřitelné BER). Naopak od 16-QAM nám roste bitová chybovost.

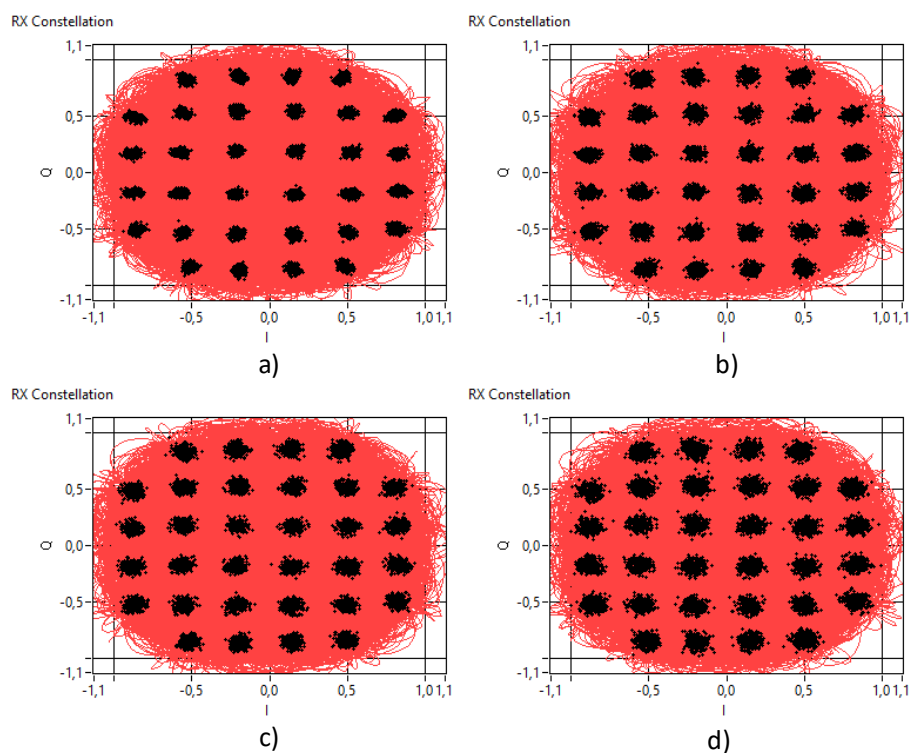
Porovnání parametrů  $E_b/N_0$ , EVM u deště 42 l/min a prázdného boxu lze vidět na následujících grafech č. 61 - 62. Na první pohled si můžeme všimnout výrazného poklesu hodnot  $E_b/N_0$  a nárůstu EVM oproti referenci (prázdný box). Například u modulační 4-QAM při šířce pásma 1 MHz je odstup signálu od šumu téměř o 10 dB nižší než u reference. Dochází zde k velkému zhoršení podmínek pro komunikaci. Můžeme si taky všimnout, že nejvyšší proměřená modulační byla 128-QAM při šířce pásma 1 MHz.

Porovnání konstelační diagramů 32-QAM pro různé šířky pásma 1 - 4 MHz lze vidět na obrázku 60. Můžeme si všimnout, že s větší šířkou pásma konstelační body jsou více roztažené od středu (od své ideální podoby) tzn. může docházet k nárůstu bitové chybovosti. Více konstelační diagramů, grafů a tabulek s naměřenými hodnotami lze nalézt na přiloženém CD.

Měření nám taky ovlivňovaly kapky vody na boční stranách boxu. Tento vliv jde vidět v grafu č. 63, kde jsou změřeny frekvenční útlumové charakteristiky. První křivka odpovídá tomu, kdy v boxu byl déšť, následující po odstranění prostřední příčky a poslední box bez deště. Po odstranění prostřední příčky nám klesl útlum o 3 dB.

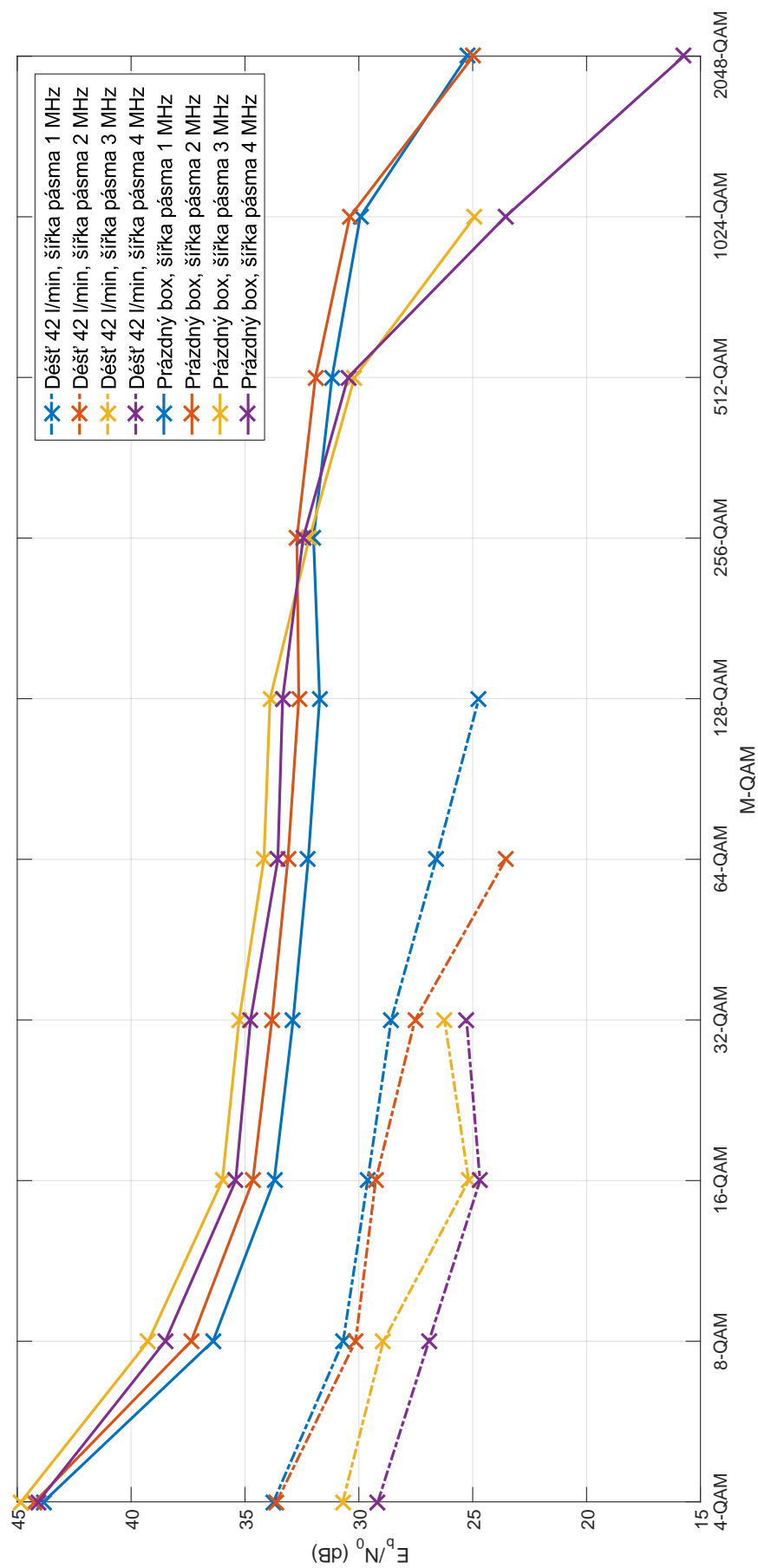


Obrázek 59: Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - déšť 42 l/min.

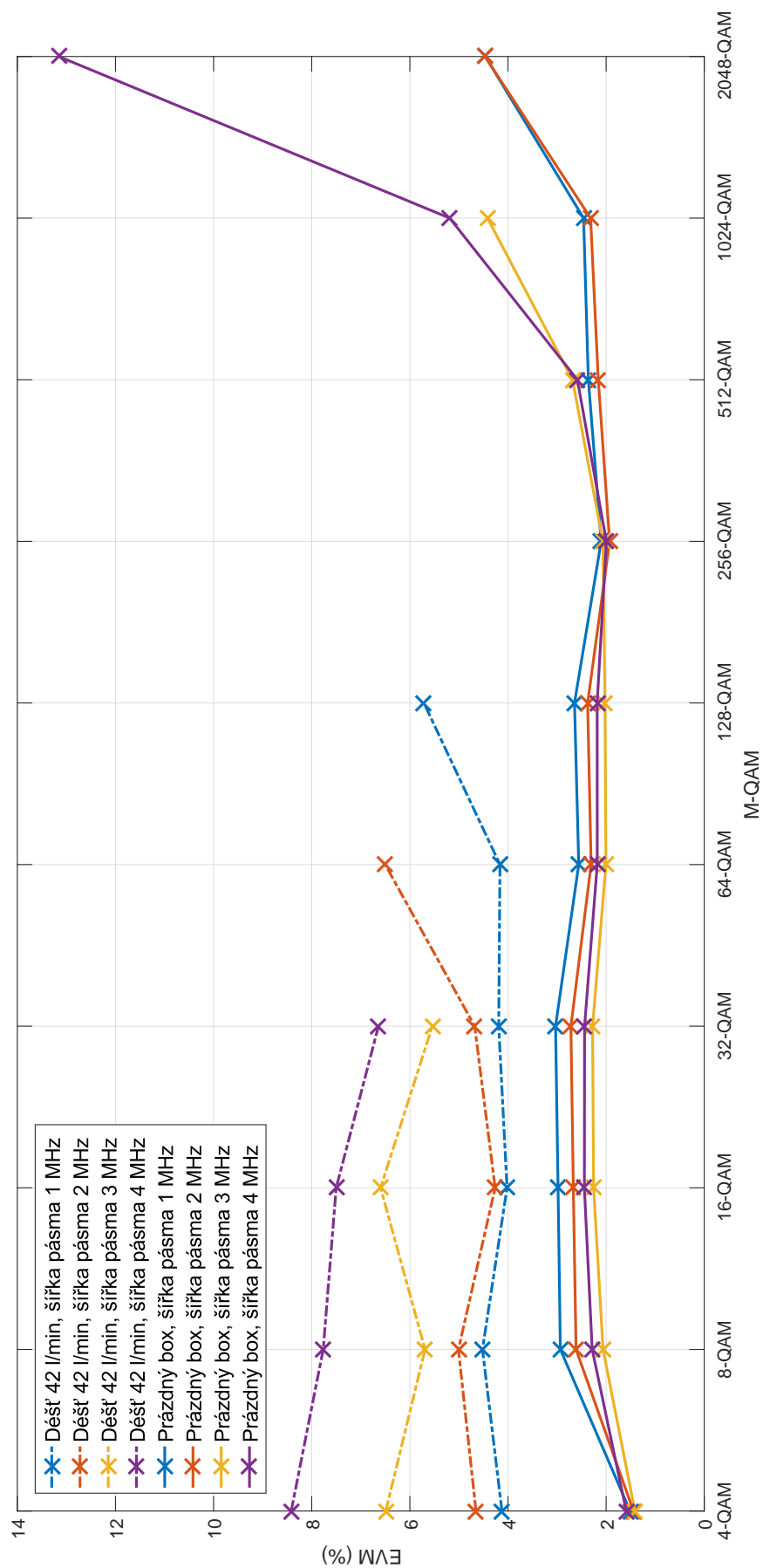


Obrázek 60: Konstelační diagramy 32-QAM u deště 42 l/min a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz.

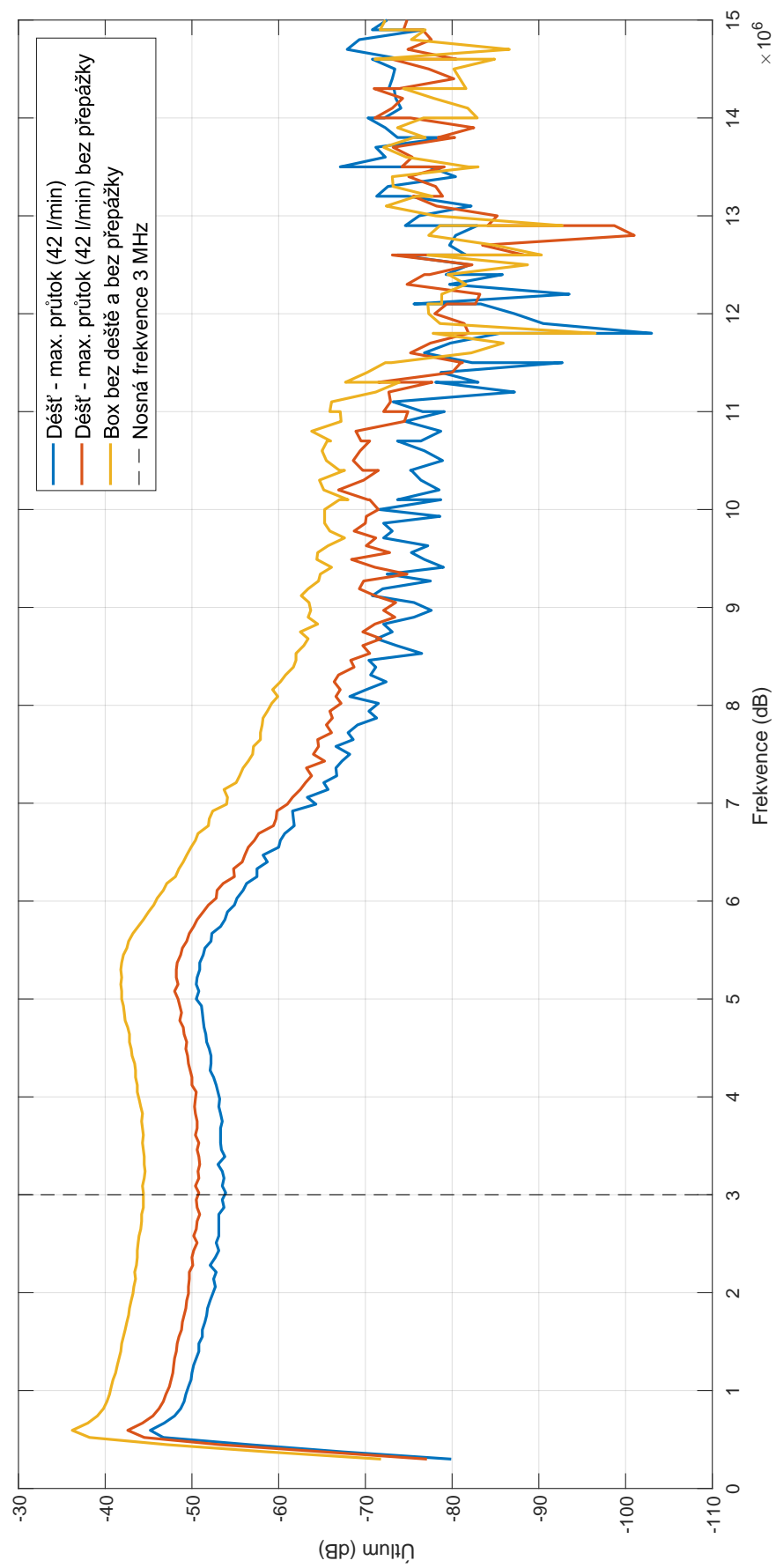




Obrázek 61: Porovnání parametru  $E_b/N_0$  jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 42 l/min a prázdného boxu.



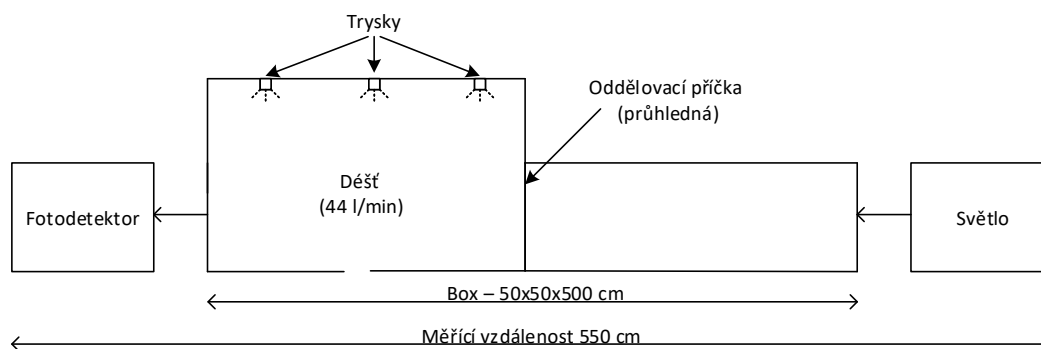
Obrázek 62: Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 42 l/min a prázdného boxu.



Obrázek 63: Frekvenční útlumové charakteristiky pro déšť 42 l/min.

## 9.6 Déšť 22 l/min

Pro měření se deštěm byla u boxu odstraněna polovina vrchního dílu a nad tuto část boxu byla vložena konstrukce s třemi tryskami. Ve spodním dílu boxu byl otvor pro odtok vody a pod ním nádoba pro zachycení vody. Voda byla přiváděna do trysek pomocí kompresoru. Díky kompresoru a nádobě pod odtokem se vytvořil uzavřený okruh. Návrh měření lze vidět 64. Průtok vody byl



Obrázek 64: Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro dešť (22 l/min).

nastaven na 22 l/min.

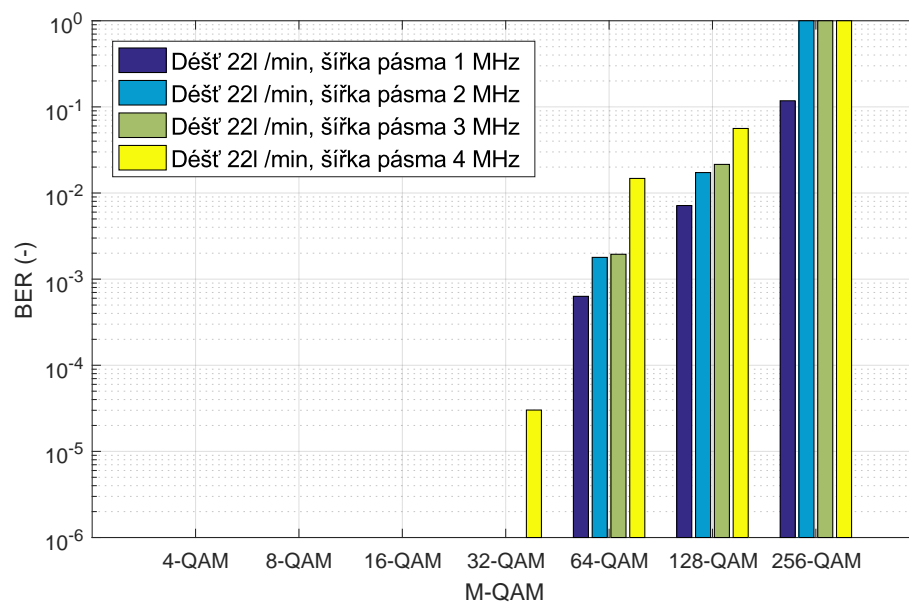
### 9.6.1 Zpracování a analýza výsledků

Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz názorně uvedeno na obrázku č. 65. Můžeme si všimnout, že do modulace 16-QAM je hodnota BER menší než  $10E-06$  (neměřitelné BER). Naopak od 32-QAM nám roste bitová chybovost.

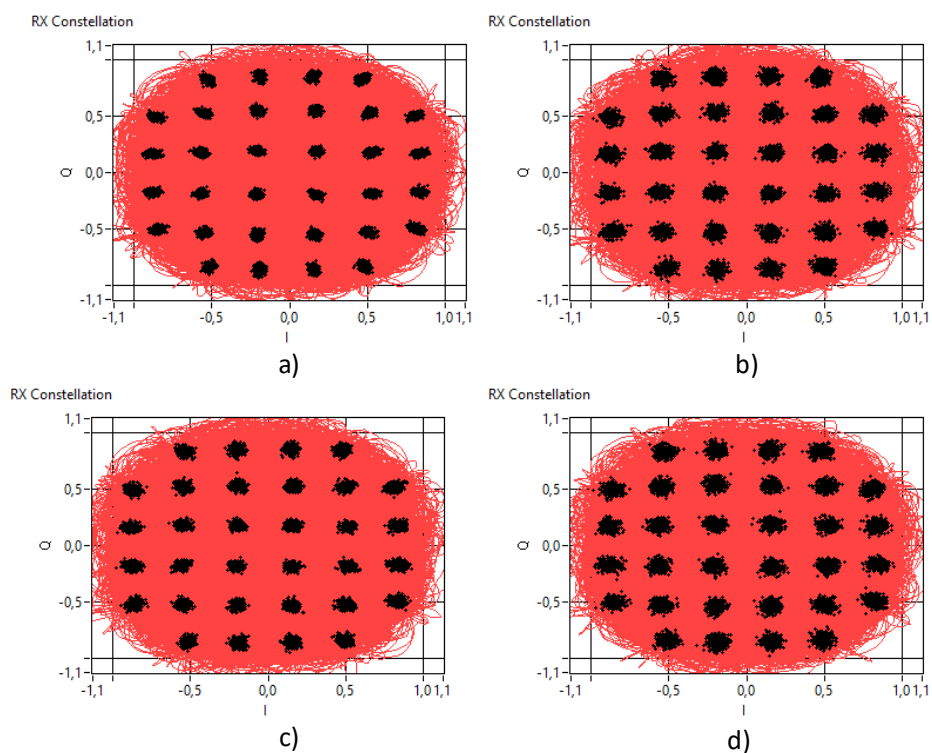
Porovnání parametrů  $E_b/N_0$ , EVM u deště 22 l/min a prázdného boxu lze vidět na následujících grafech č. 67 - 68. Na první pohled si můžeme všimnout výrazného poklesu hodnot  $E_b/N_0$  a nárustu EVM oproti referenci (prázdný box). Například u modulace 4-QAM při šířce pásma 1 MHz je odstup signálu od šumu téměř o 7 dB nižší než u reference. Dochází zde k velkému zhoršení podmínek pro komunikaci. Můžeme si taky všimnout, že nejvyšší proměřená modulace byla 256-QAM při šířce pásma 1 MHz. Obecně lze říci, že s hustějším deštěm dochází k většímu zhoršení podmínek pro komunikaci.

Porovnání konstelační diagramů 32-QAM pro různé šířky pásma 1 - 4 MHz lze vidět na obrázku 66. Můžeme si všimnout, že s větší šířkou pásma konstelační body jsou více roztažené od středu (od své ideální podoby) tzn. může docházet k nárustu bitové chybovosti. Více konstelační diagramů, grafů a tabulek s naměřenými hodnotami lze nalézt na přiloženém CD.

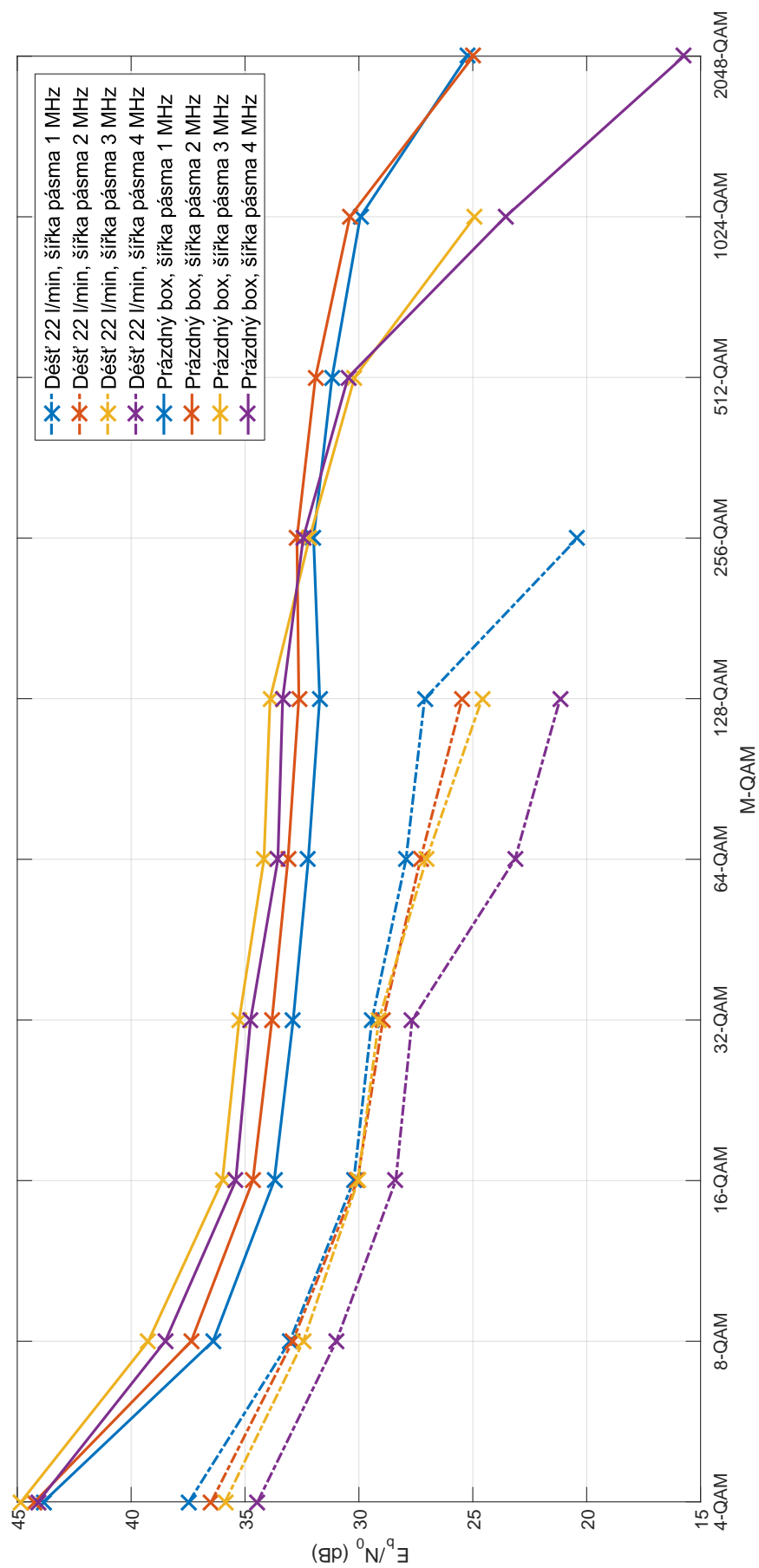
Měření nám taky ovlivňovaly kapky vody na boční stranách boxu. Tento vliv jde vidět v grafu č. 69, kde jsou změřeny frekvenční útlumové charakteristiky. První křivka odpovídá tomu, kdy v boxu byl dešť, následující po odstranění prostřední příčky a poslední box bez deště. Po odstranění prostřední příčky nám klesl útlum o 4 dB.



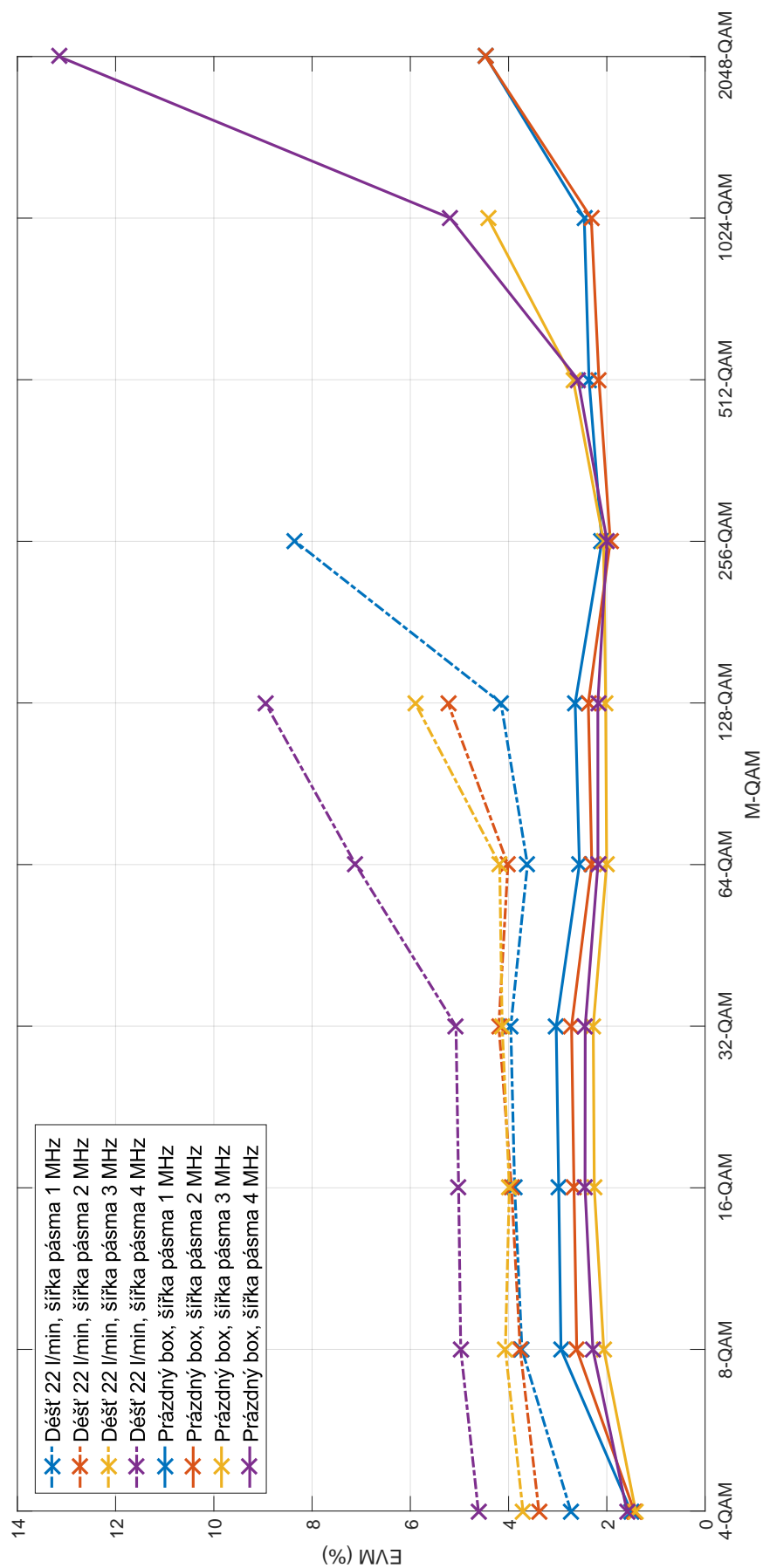
Obrázek 65: Porovnání parametru BER při šířce pásma 1 - 4 MHz - déšť 22 l/min.



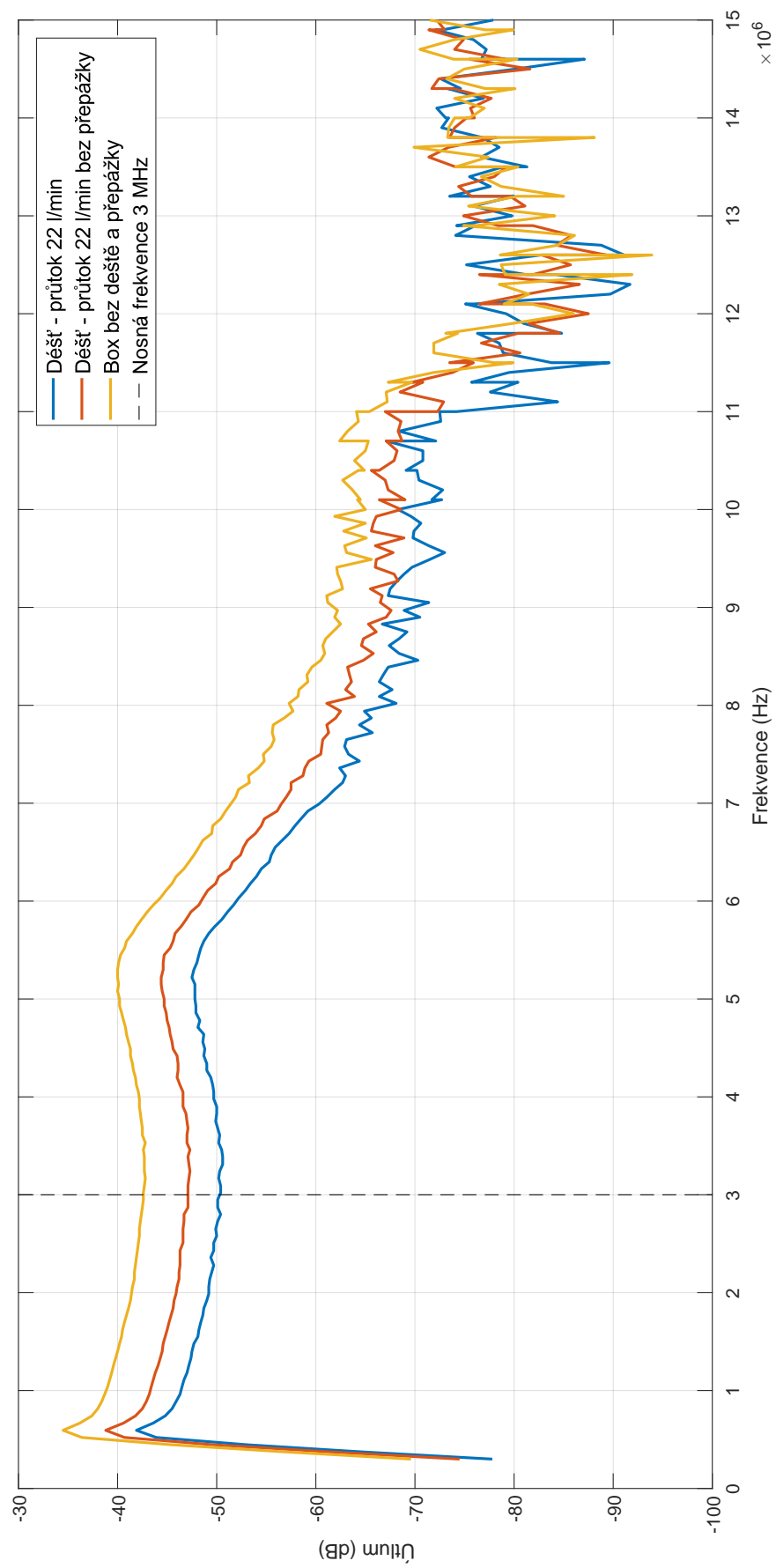
Obrázek 66: Konstelační diagramy 32-QAM u deště 22 l/min a různých šířek pásma - a) BW = 1 MHz, b) BW = 2 MHz, c) BW = 3 MHz, d) BW = 4 MHz.



Obrázek 67: Porovnání parametru  $E_b/N_0$  jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 22 l/min a prázdného boxu.



Obrázek 68: Porovnání parametru EVM jednotlivých M-QAM modulací, šířek pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u deště 22 l/min a prázdného boxu.

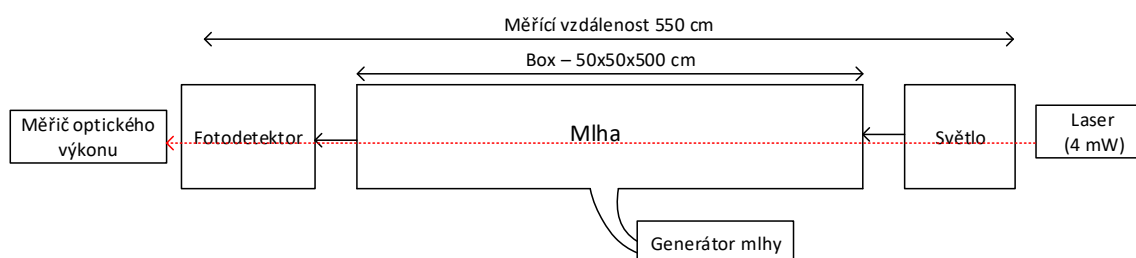


Obrázek 69: Frekvenční útlumové charakteristiky pro déšť 22 l/min.



## 9.7 Mlha

Pro měření s mlhou byl box uzavřen a ze spodní strany byl otvorem pouštěna mlha z generátoru. Návrh měření lze vidět 70. Toto měření se od ostatních liší v tom, že jsme neměli neustále stejné podmínky v boxu. Mlha se v boxu postupně rozptylovala. Kvůli tomuto byl do měřícího aparátu přidán laser (4 mW) a měřič optického výkonu. Během měření se tedy navíc zapisovaly hodnoty zachyceného optického výkonu laseru, které nám pak sloužily jako reference. Kvůli rozpadu mlhy se nám postupně otevíraly vyšší modulační rychlosti a jakmile dosahovaly hodnoty požadované bitové chybovosti ( $BER \approx 10E-03$ ), tak se provedlo měření. Měření všech šířek pásma probíhalo zároveň. Graf rozpadu mlhy s vyznačenými optickými výkony laseru a hodnotou BER pro šířku pásma 1 MHz můžete vidět na obrázku č. 72



Obrázek 70: Návrh měření se zadním brzdovým světlem automobilu pro mlhu.

### 9.7.1 Zpracování a analýza výsledků

V následující tabulce č. 9 jsou zaznamenány hodnoty optického výkonu laseru po průchodu mlhou. Jelikož se mlha rozpadala s postupem času, tak se nám postupně zpřístupňovaly vyšší modulační rychlosti a k tomu se zaznamenal optický výkon laseru. Z tabulky lze vyčíst, že pro fungování vyšších modulačních rychlostí tzn. od 128-QAM je potřeba aby mlhou prošla čtvrtina optického výkonu laseru na měřící přístroj. Z tohoto důvodu následující grafy ukazují minimální hodnoty ( $E_b/N_0$ , EVM, MER, BER), kdy začala probíhat komunikace mezi vysílačem a přijímačem u daných modulačních rychlostí.

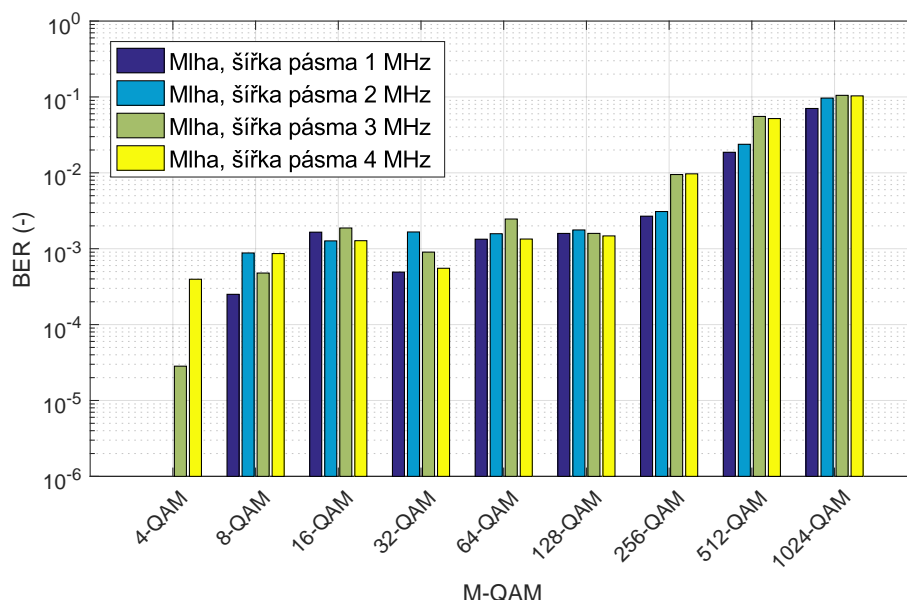
Naměřené bitové chybovosti lze vidět v grafu č. 71. Graf ukazuje hodnoty BER u daných modulačních rychlostí, při kterých bitová chybovost byla menší než 1. Ke grafu je třeba použít tabulku č. 9, kde je k dané modulační rychlosti a šířce pásma zaznamenána hodnota optického výkonu laseru po průchodu mlhou. Například, u modulační rychlosti 128-QAM a šířce pásma 2 MHz musela projít mlhou  $\frac{1}{4}$  optického výkonu. U grafů týkajících se parametrů  $E_b/N_0$ , EVM nebo MER je taky nutno použít referenční tabulku č. 9.

V obrázku č. 72 lze vidět graf rozpadu mlhy s vyznačenými optickými výkony laseru a hodnotou BER pro šířku pásma 1 MHz. Například pro vyšší modulační rychlosti od 256-QAM je potřeba, aby mlhou prošlo více než polovina optického výkonu laseru.

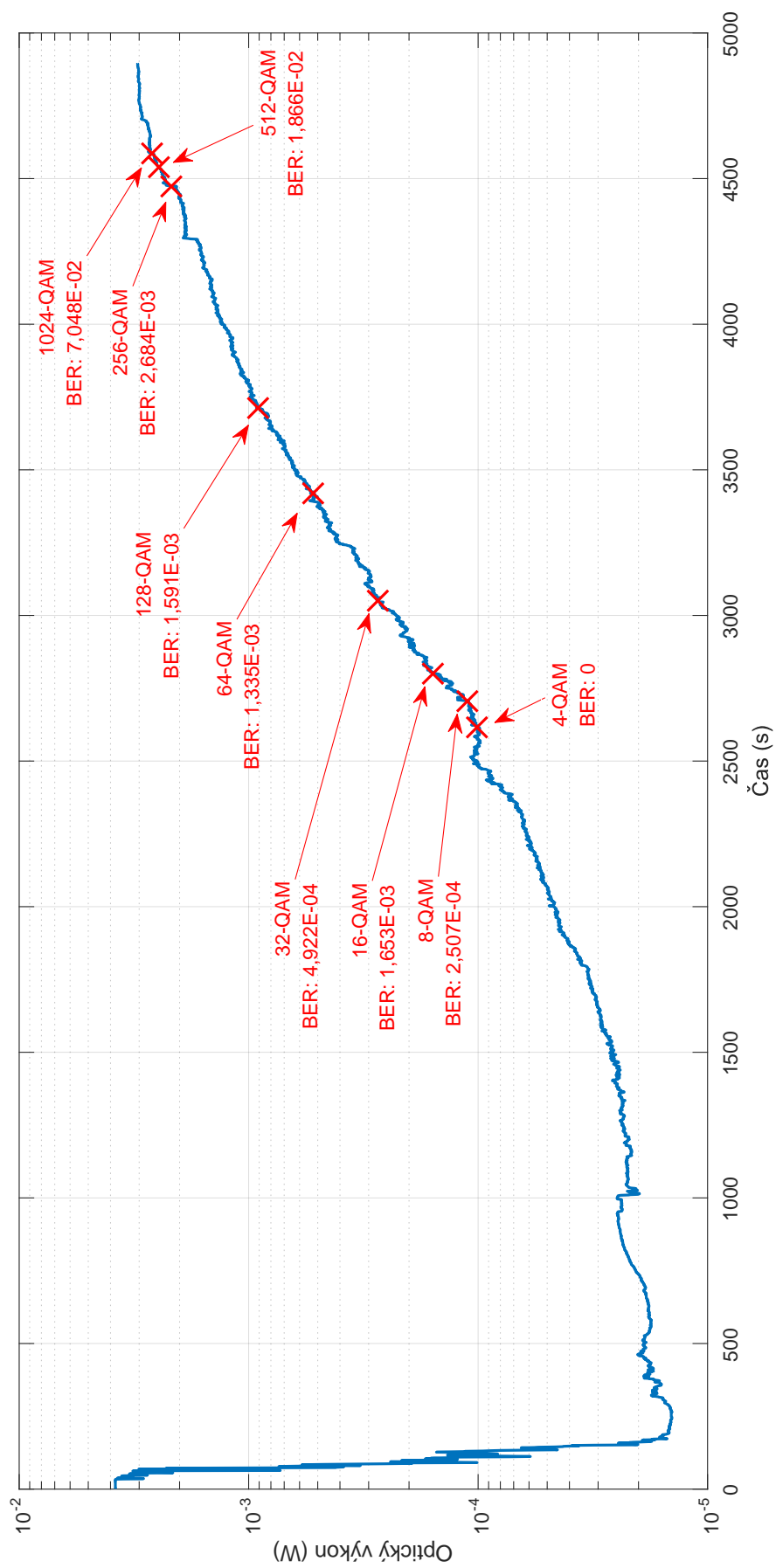
Obycně lze říci, že mlha má největší vliv na komunikaci viditelným světlem ze všech meteorologických jevů. To lze taky vidět na frekvenční útlumové charakteristice v grafu č. 75. K jednotlivým křivkám byly poznačeny hodnoty reference tzn. hodnoty optického výkonu laseru po průchodu mlhou. Např. při hodnotě 1 mW výkonu laseru pro průchodu mlhou narostl útlum o 63 dB vůči referenci vektorového síťového analyzátoru. Ostatní grafy a tabulky naměřených hodnot jsou umístěny v příloze na CD.

Tabulka 9: Tabulka mezních hodnot optického výkonu laseru pro různé modulace a šířek pásma po průchodu mlhou.

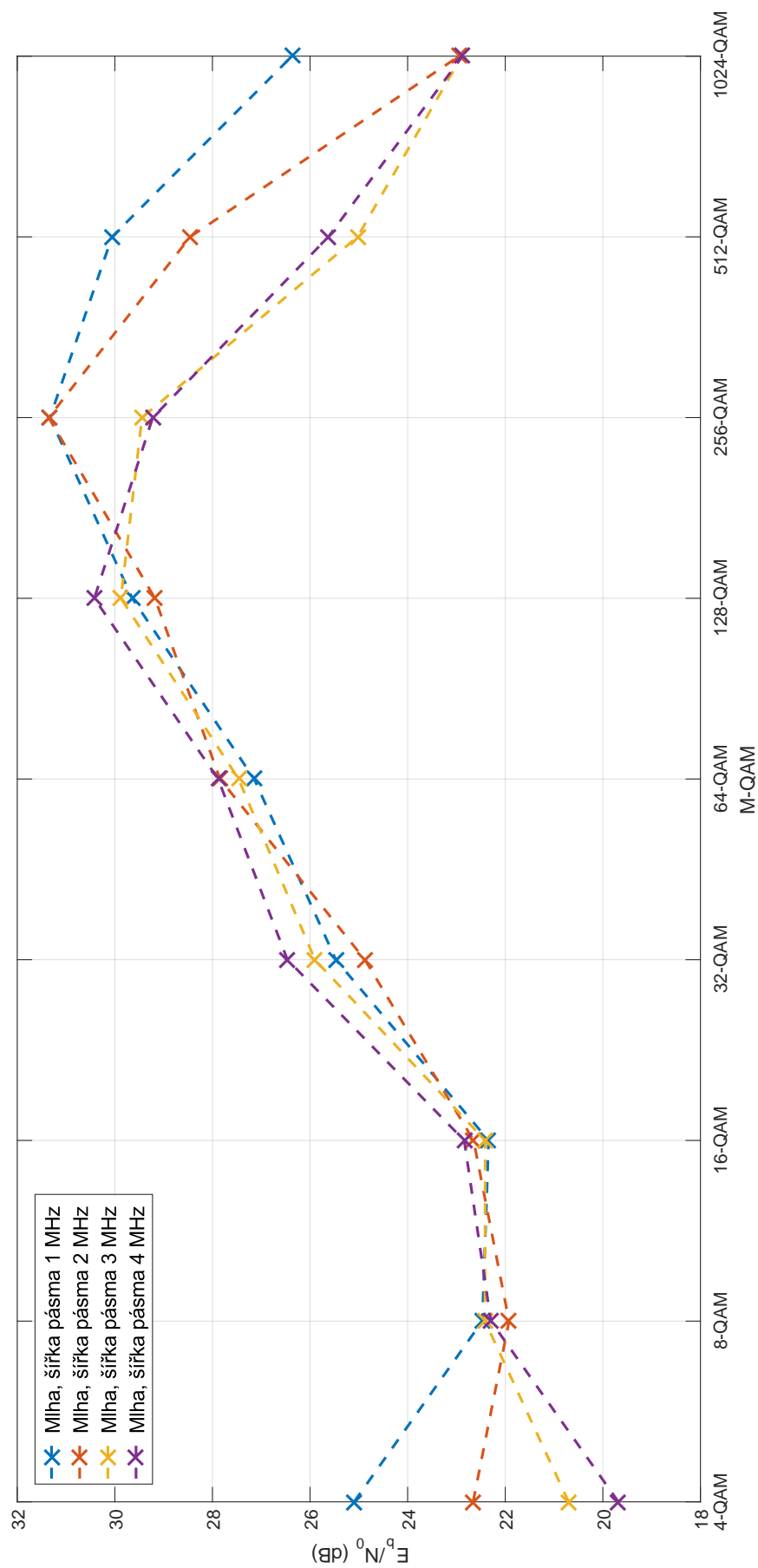
M-QAM	Šířka pásma			
-	1 MHz	2 MHz	3 MHz	4 MHz
4-QAM	101 uW	95 uW	97 uW	93 uW
8-QAM	112 uW	135 uW	175 uW	189 uW
16-QAM	154 uW	205 uW	250 uW	276 uW
32-QAM	275 uW	308 uW	463 uW	550 uW
64-QAM	525 uW	780 uW	930 uW	951 uW
128-QAM	905 uW	1,095 mW	1,399 mW	1,550 mW
256-QAM	2,180 mW	2,394 mW	2,545 mW	2,585 mW
512-QAM	2,475 mW	2,522 mW	2,735 mW	2,930 mW
1024-QAM	2,640 mW	2,955 mW	3,120 mW	3,172 mW



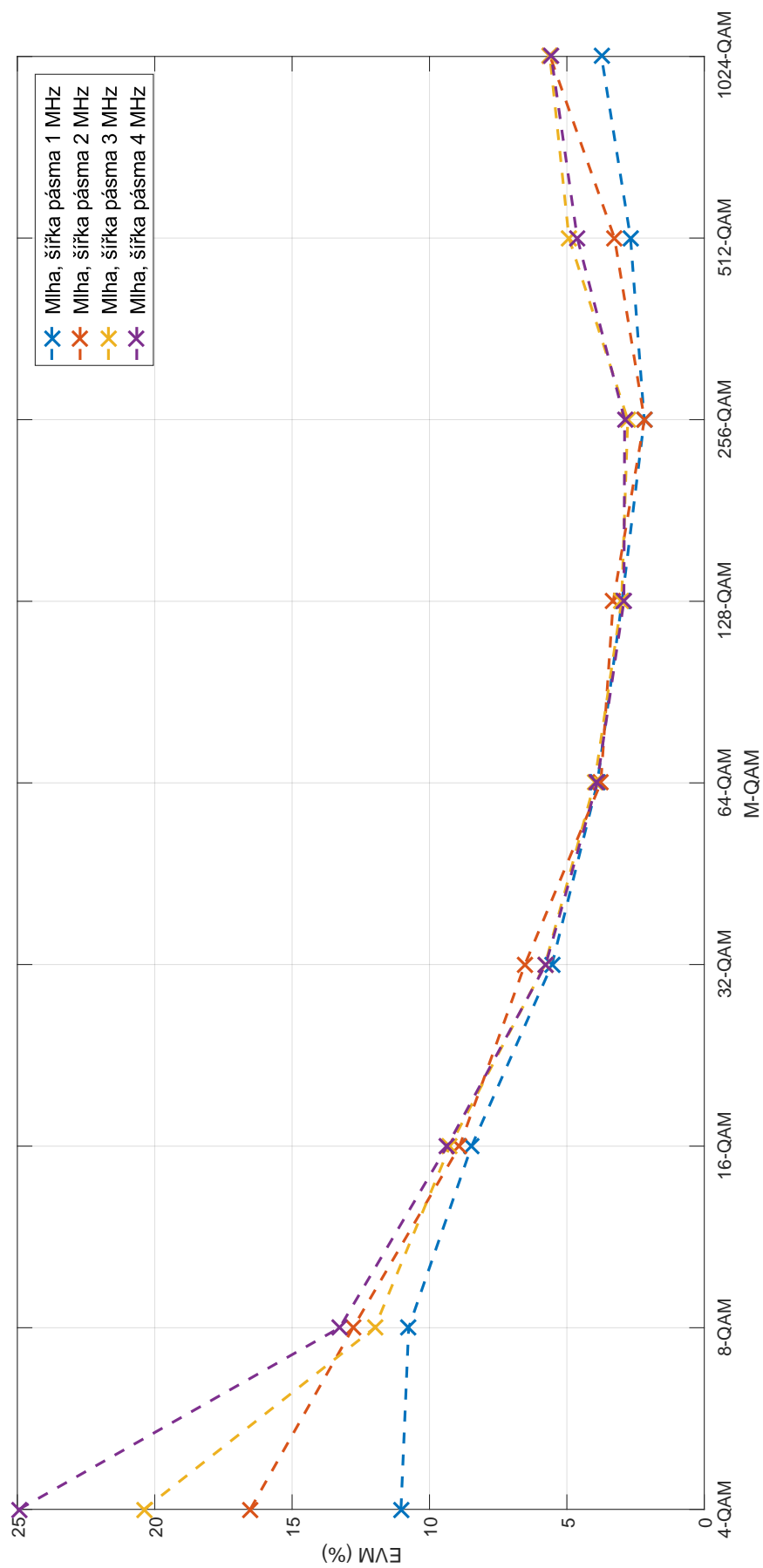
Obrázek 71: Naměřené bitové chybovosti daných modulací při šířce pásma 1 - 4 MHz a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy.



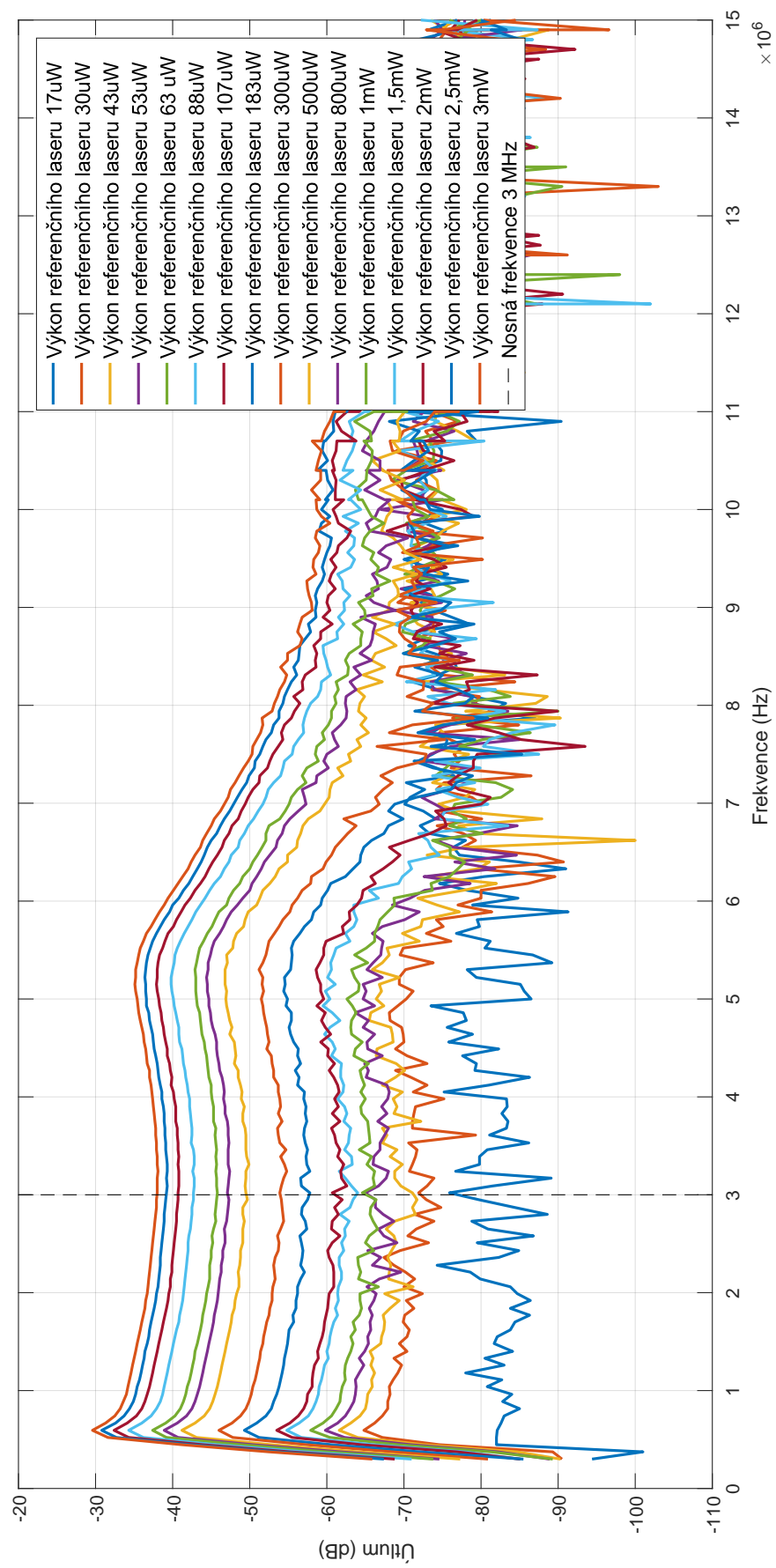
Obrázek 72: Graf rozpadu mlhy s vyznačenými optickými výkony laseru a hodnotou BER pro šířku pásma 1 MHz.



Obrázek 73: Graf minimálních hodnot parametru  $E_b/N_0$  pro fungování jednotlivých M-QAM modulací na dané šířce pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy.



Obrázek 74: Graf minimálních hodnot parametru EVM pro fungování jednotlivých M-QAM modulací na dané šířce pásma a měřené vzdálenosti 550 cm u mlhy.



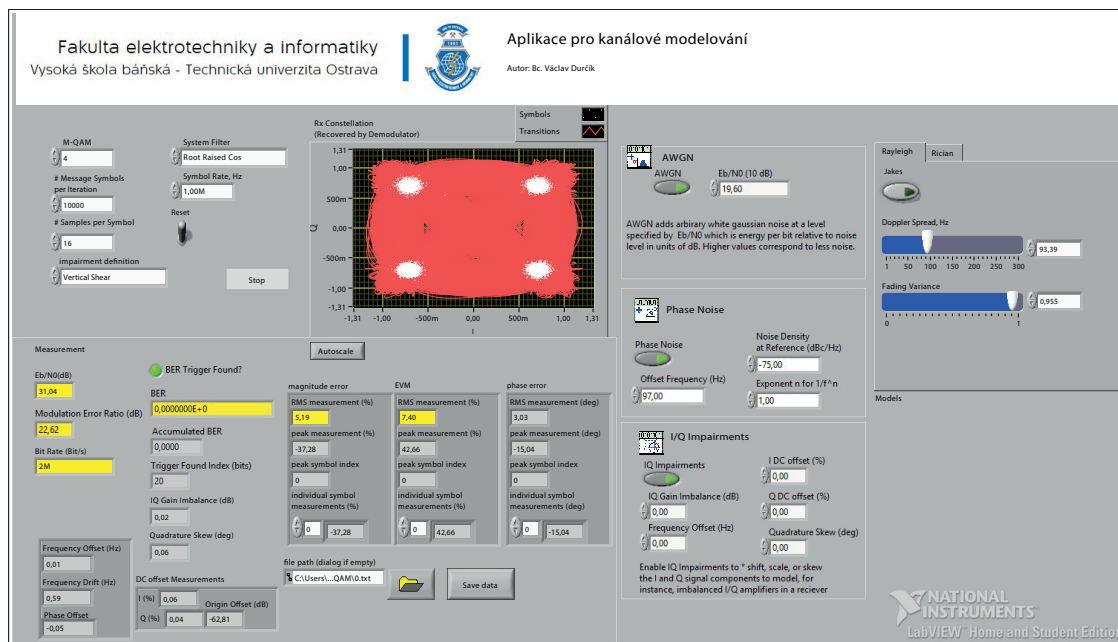
Obrázek 75: Frekvenční útlumová charakteristika při rozpadu mlhy.

## 10 Simulování bezdrátového přenosového kanálu

Tato kapitola se zabývá simulováním bezdrátového přenosového kanálu na základě zjištěných reálných hodnot z měření. Z výsledků měření je zřejmé, že se nám neprojevuje ve výsledku žádný vyšší fázový šum, vliv odrazů nebo výrazné vychýlení konstelačních bodů od své ideální podoby. Mírně se projevuje amplitudové zkreslení, které je způsobeno samotným hardwarem. Rozhodující je úroveň signálu na přijímací straně tzn. mění se nám odstup signálu od šumu ( $E_b/N_0$ ). Tato situace lze modelovat pomocí aditivního bílého gaussovského šumu (AWGN). Tato funkce je aplikovaná ve vytvořené aplikaci v LabVIEW, která je popsána v podkapitole č. 10.1.

### 10.1 Aplikace pro simulování bezdrátového kanálu

Pro samotné simulování byla vytvořena aplikace v LabVIEW zobrazena na obrázku č. 76. Tato aplikace oproti předchozí (kap. 7.1.3) neobsahuje propojení s USRP a navíc jsou naimplementované funkční modely pro modelování bezdrátového přenosového kanálu např. Rayleigh, Rician model nebo funkce pro přidávání fázového šumu. Pro naše měření je důležitá funkce, kterou jsme schopni přidávat aditivní gaussovský šum do systému. Přidáváním tohoto šumu lze ovlivňovat přenosový kanál a měřené parametry  $E_b/N_0$ , EVM, BER, MER atd. Ukázku čelního panelu aplikace lze vidět na obrázku č. 76.



Obrázek 76: Ukázka čelního panelu aplikace pro simulování bezdrátového přenosového kanálu.

Aplikace je připravená pro věrohodné simulování přenosového kanálu. Lze v ní nastavit parametry pro vysílání či přijímání a ukládat naměřená data do textového souboru. Součástí aplikace je zobrazení konstelačního diagramu na přijímací straně a výpočet teoretické přenosové rychlosti. Tato vytvořená aplikace je obsažena v příloze na CD.

Aplikace umožňuje několik následujících nastavení např.:

- Šířka pásma (Symbol Rate)
- Šířka vzorku (Sample Width) - max. 16 bitů
- QAM modulace (M-QAM) - max. 4096-QAM
- Počet symbolů zprávy (Message Symbols)
- Tx filtry (TX filter) - Raised Cosine nebo Root Raised Cos
- Počet vzorků na symbol (Samples per Symbol)

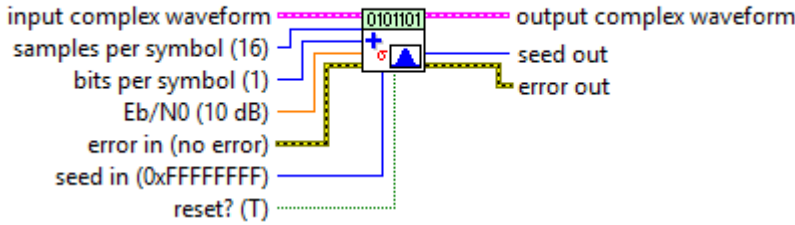
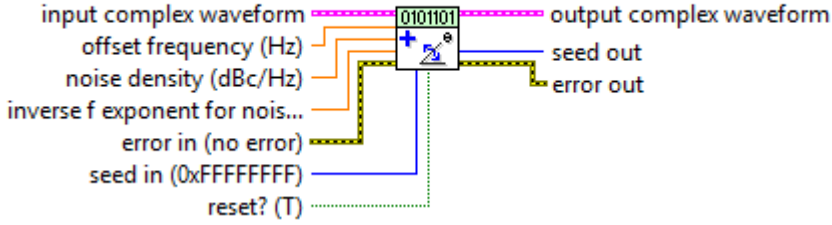
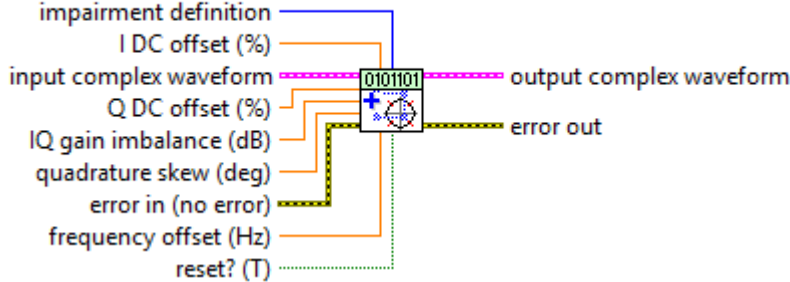
Jak už bylo řečeno aplikace obsahuje navíc funkční modely (funkce) pro modelování přenosového kanálu:

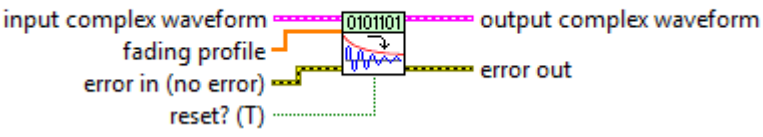
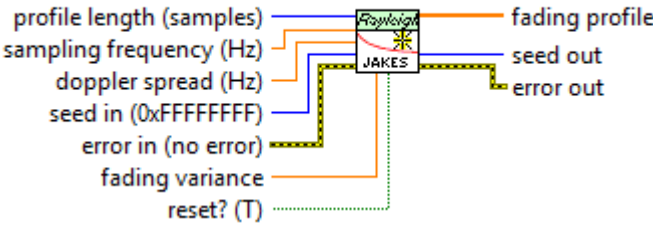
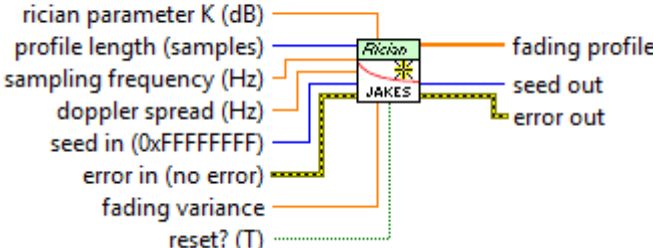
- funkce pro přidávání aditivního bílého gaussovského šumu (AWGN)
- funkce pro přidávání fázového šumu (Phase Noise)
- kvadrurní zkosení (I/Q Impairments)
- Raileigh model
- Rician model

Aplikace obsahuje stejné funkce, které jsou popsány v tabulce č. 4 (kap. 7.1.3). Přidané funkce pro simulování jsou popsány v následující tabulce č. 10.



Tabulka 10: Vybrané funkce použité v aplikaci pro simulaci přenosového kanálu.

<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Add AWGN.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující přidávání aditivní bílého gaussovského šumu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Add Phase Noise.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující ovlivňovat fázový šum přenosového kanálu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Apply IQ Impairments.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující měnit fázové zkosení (natočení konstelace).</p>

<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Apply Flat Fading Profile.vi</b></p> 	<p>Blok umožňující aplikace plochého úniku (flat fading) na přenášený signál.</p>
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Rayleigh Fading Profile (Jakes).vi</b></p> 	<p>Blok umožňující aplikovat Rayleighův model na přenášený signál. Lze nastavit úroveň úniků a dopplerovské kmitočtové rozšíření signálu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>niDMT.lvlib:MT Rician Fading Profile (Jakes).vi</b></p> 	<p>Blok umožňující aplikovat Ricianův model na přenášený signál. Lze nastavit úroveň úniků, dopplerovské kmitočtové rozšíření signálu a Ricianův parametr K.</p>

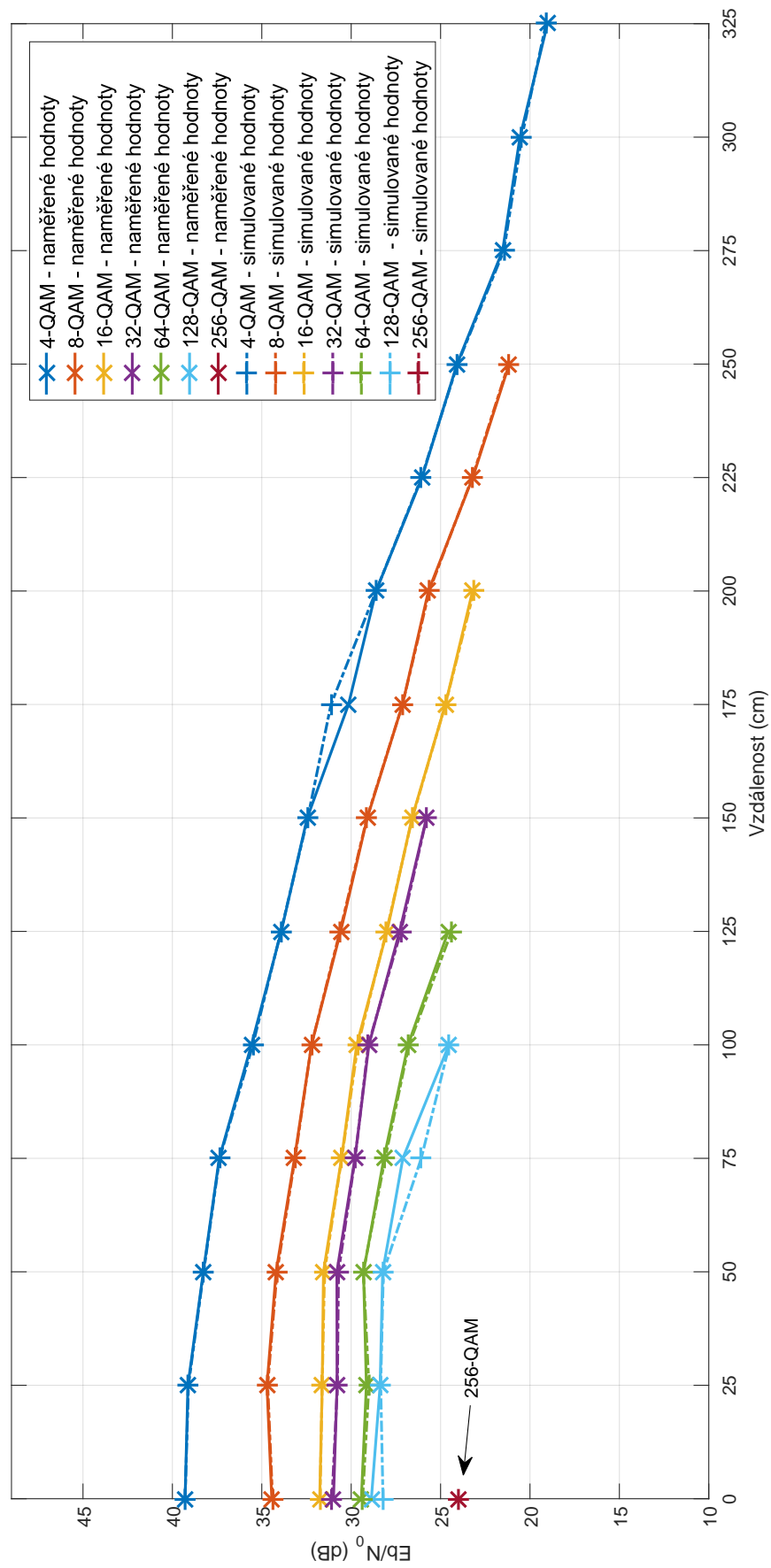
## 10.2 Simulace bezdrátového přenosového kanálu

Na základě získaných hodnot z měření se stropním světlem nebo zadním brzdovým světlem jsme získali potřebné informace k simulování bezdrátového přenosového kanálu. Pomocí vytvořené aplikace pro simulování se provedlo pár vybraných simulací popsané následující podkapitolách č. 10.2.1 a 10.2.2.

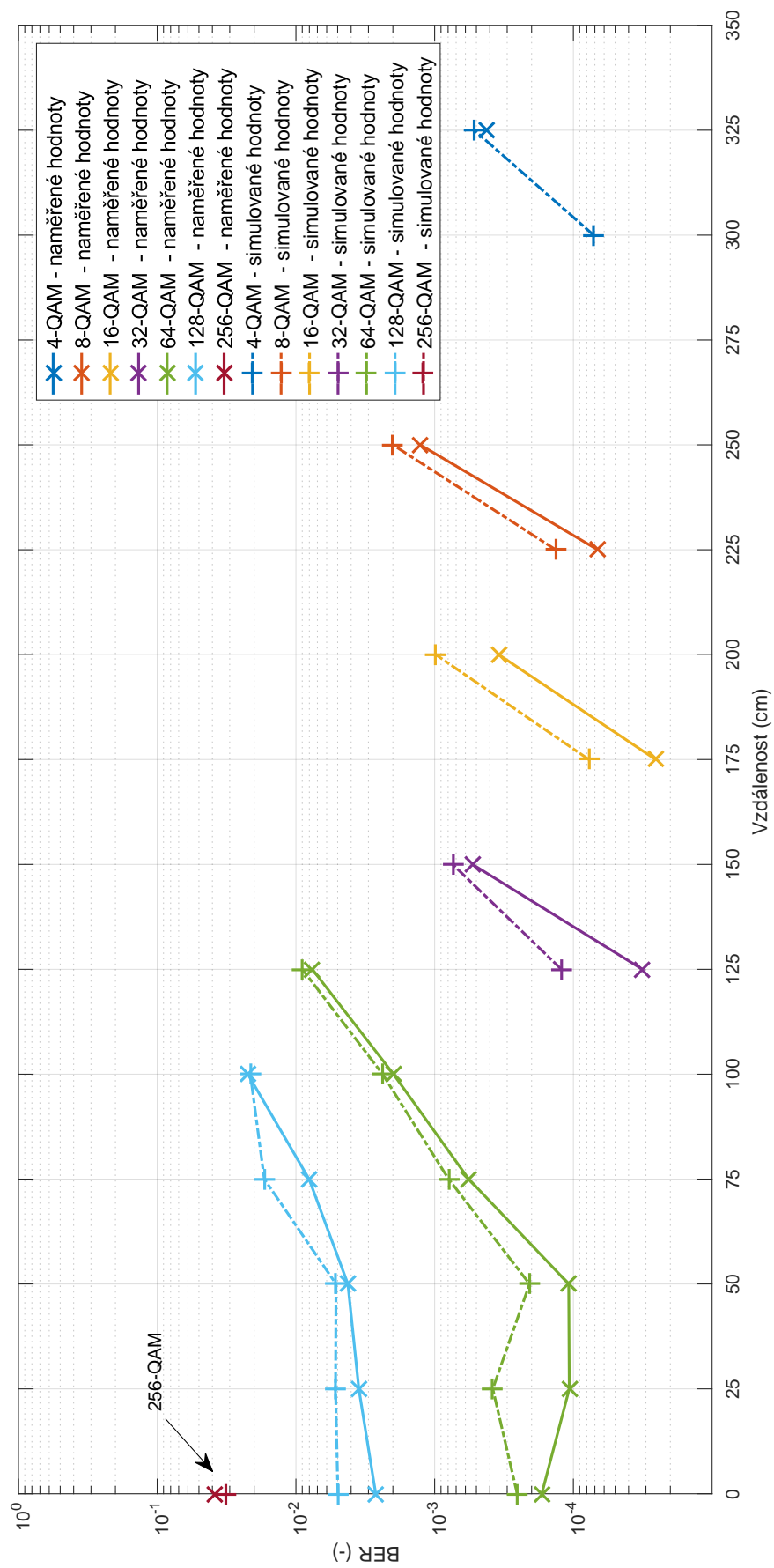
### 10.2.1 Simulace stropního světla

V první fázi došlo k simulaci stropního světla za pomoci vytvořené aplikace. Nastavení aplikace bylo identické s reálným měřením. Pomocí funkce pro přidávání aditivního bílého gaussovského šumu se snažilo přiblížit reálným naměřeným hodnotám parametrů EVM, MER, BER a zejména  $E_b/N_0$ .

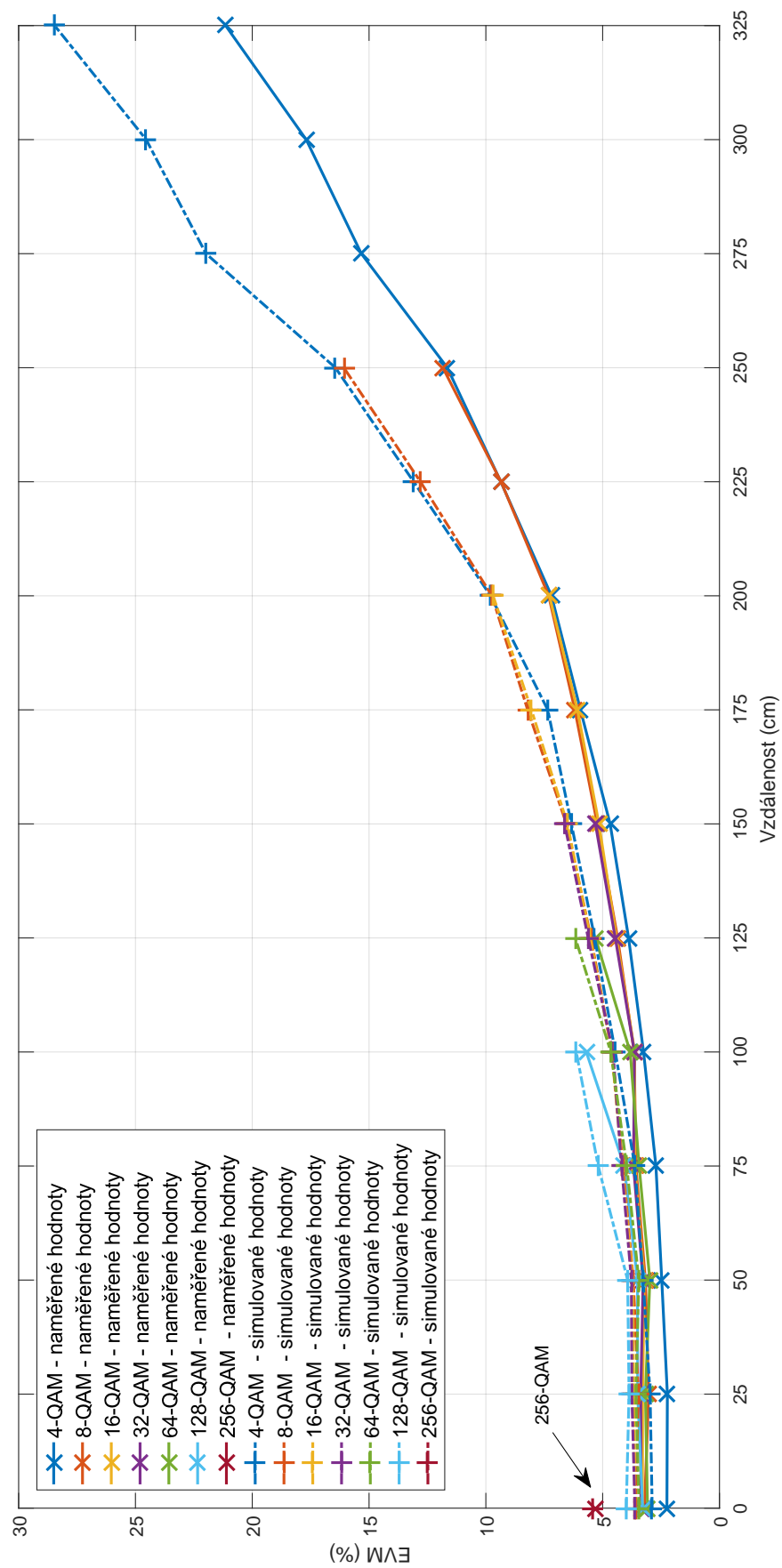
Pro ukázkou byl nasimulován přenosový kanál pro stropní světlo se šířkou pásma 1 MHz, který vycházel z naměřených hodnot. Výsledné porovnání reálných a simulovaných hodnot lze vidět v grafech č. 77 - 79. V grafu č. 77 si můžeme všimnout minimálního rozdílu mezi reálnými a simulovanými hodnotami parametru  $E_b/N_0$ . U ostatních parametrů jsou hodnoty mírně rozdílné. Je to dáno tím, jak moc přesně jsme schopni se přiblížit reálným hodnotám při nastavování simulace. Zejména v případech, kdy je hodnota odstupu signálu od šumu menší tzn. je více zarušen přenosový kanál. U grafu č. 78 jsou pouze zobrazeny hodnoty měřitelné bitové chybovosti. Ostatní grafy a tabulky naměřených hodnot jsou umístěny v příloze na CD.



Obrázek 77: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru  $E_b/N_0$  při šířce pásma 1 MHz u stropního světla.



Obrázek 78: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru BER při šířce pásma 1 MHz u stropního světla.



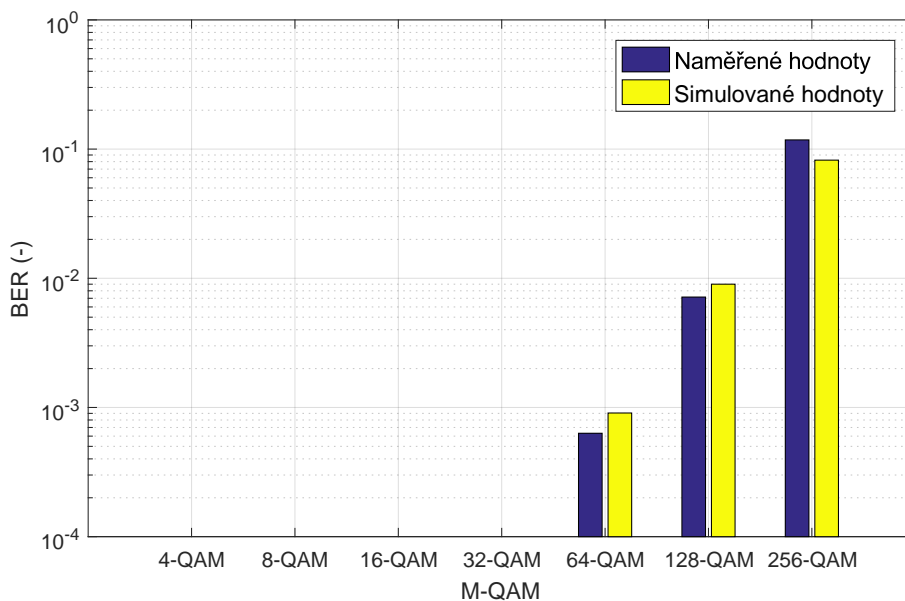
Obrázek 79: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru EVM při šířce pásma 1 MHz u stropního světla.

### 10.2.2 Simulace deště s průtokem 22 l/min

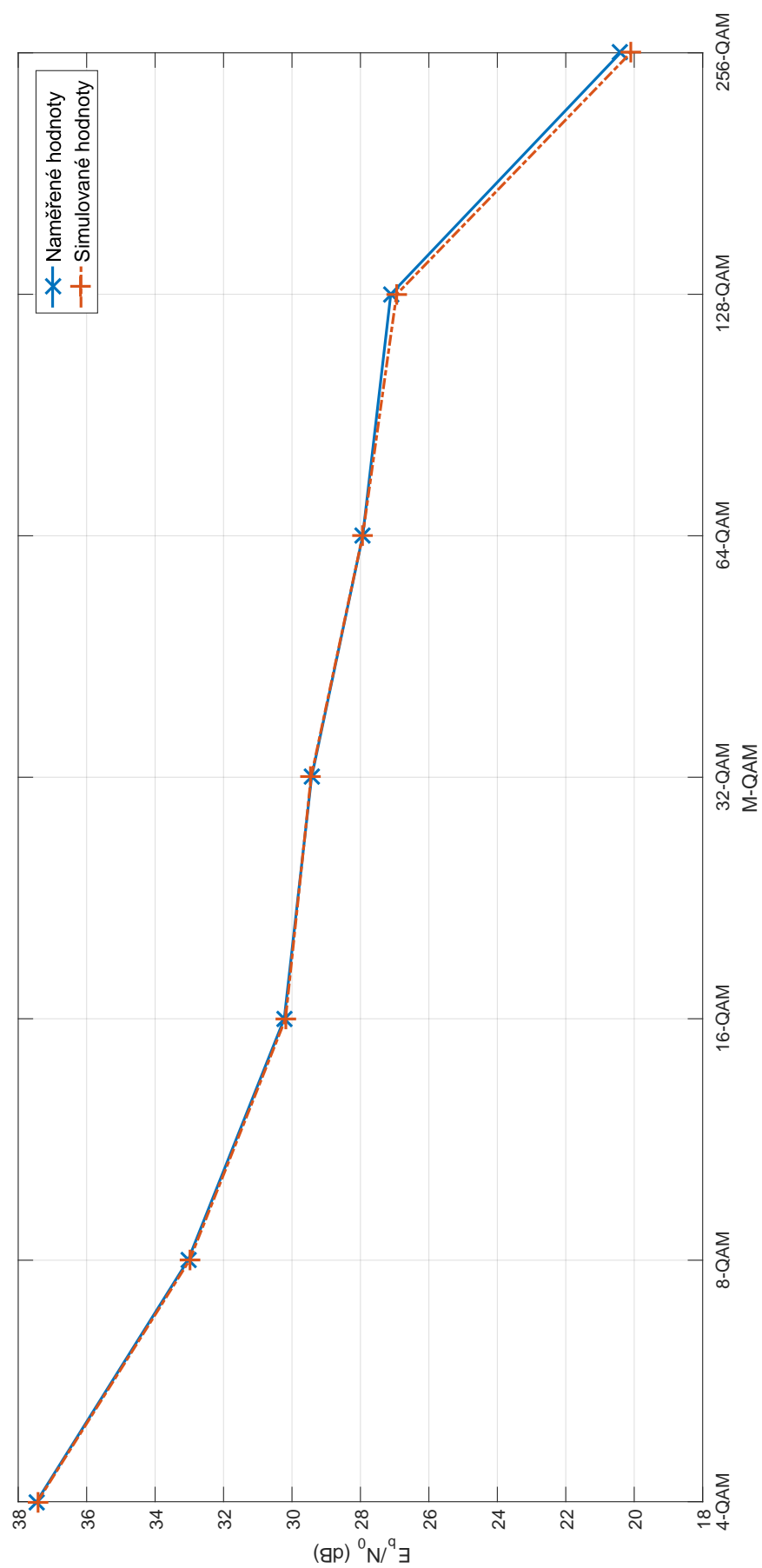
V další fázi došlo k simulaci zadního brzdového světla za pomoci vytvořené aplikace. Nastavení aplikace bylo identické s reálným měření. Pomocí funkce pro přidávání aditivního bílého gaussovského šumu se snažilo přiblížit reálným naměřeným hodnotám parametrů EVM, MER, BER a zejména  $E_b/N_0$ .

Pro ukázkou byl nasimulován přenosový kanál pro zadní brzdové světlo se šířkou pásma 1 MHz a při dešti 22 l/min, který vycházel z naměřených hodnot. Výsledné porovnání reálných a simulovaných hodnot lze vidět v grafech č. 80 - 82. V grafu č. 81 si můžeme všimnout minimálního rozdílu mezi reálnými a simulovanými hodnotami parametru  $E_b/N_0$ . U ostatních parametrů jsou hodnoty mírně rozdílné. Je to dáno tím, jak moc přesně jsme schopni se přiblížit reálným hodnotám při nastavování simulace. Zejména v případech, kdy je hodnota odstupů signálu od šumu menší tzn. je více zarušen přenosový kanál.

Ze simulovaných hodnot vyplývá, že dokážeme s mírnými odchylkami věrohodně simulovat bezdrátový přenosový kanál pomocí vytvořené aplikace v LabVIEW. Tabulky naměřených hodnot jsou umístěny v příloze na CD.

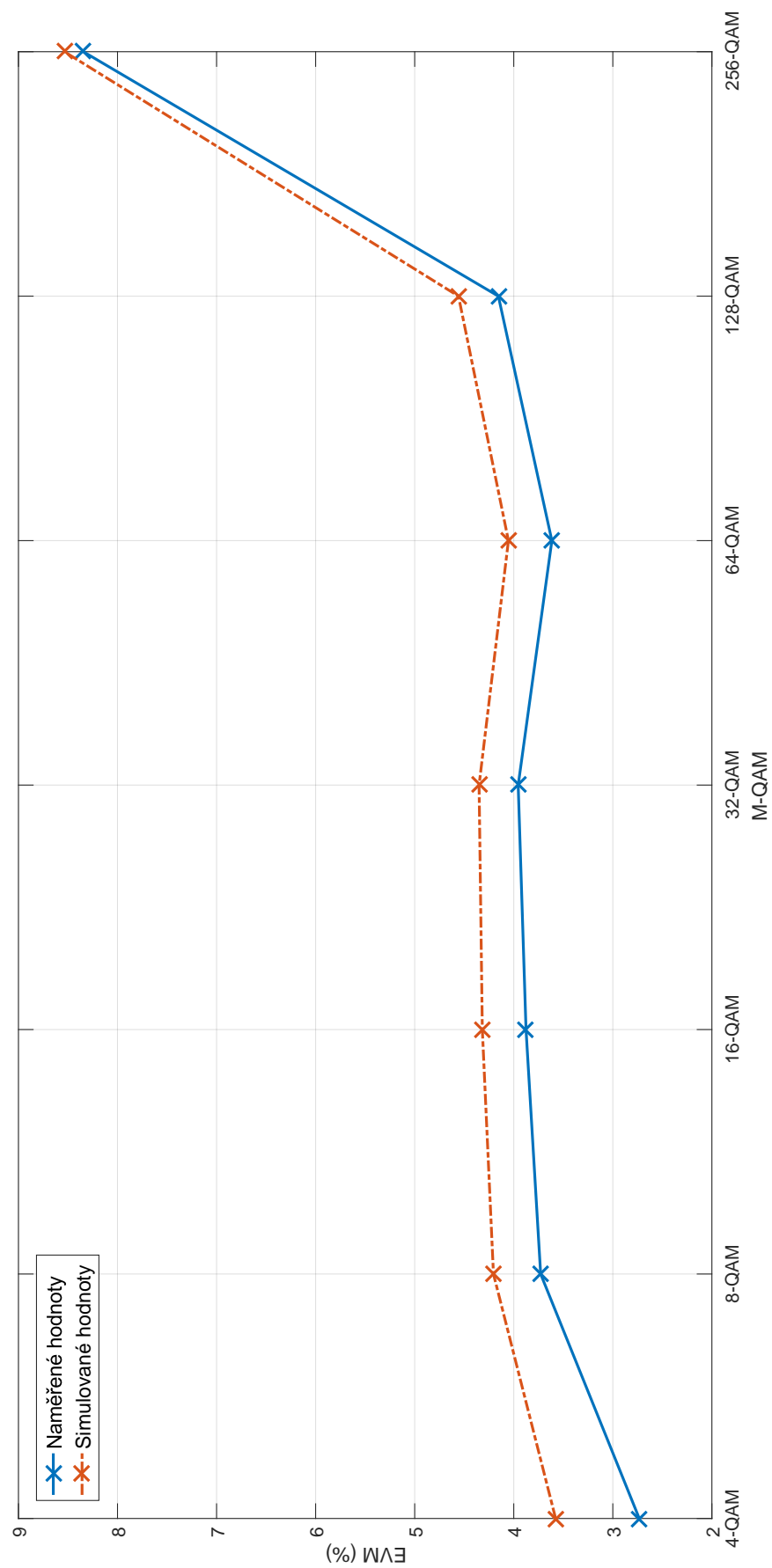


Obrázek 80: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru BER při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min.



Obrázek 81: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru  $E_b/N_0$  při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min.





Obrázek 82: Porovnání reálných a simulovaných hodnot parametru EVM při šířce pásma 1 MHz u deště 22 l/min.

### 10.2.3 Rovnice křivek z měření se stropním světlem

Z vytvořených grafů lze vidět, že rostoucí vzdáleností klesají hodnoty  $E_b/N_0$  a roste EVM. Jednotlivé body byly proloženy regresní křivkou a to kubickou třetího řádu. Tato křivka nejlépe opisuje dané body v grafech. Na základě toho lze získat rovnice pro modelování bezdrátového přenosového kanálu. Byla vytvořena výchozí rovnice č. 22, kde při dosazení vzdálenosti a hodnot koeficientů získáme parametr ( $E_b/N_0$ , EVM) v dané vzdálenosti.

$$y = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4 \quad (22)$$

kde  $y$  je měřený parametr ( $E_b/N_0$ , EVM),  $x$  je vzdálenost v centimetrech ( $x \neq 0$ ) a  $p1 - p4$  jsou koeficienty.

Pro ukázkou byly vypočteny následující koeficienty pro dané modulační šířky pásma 1 MHz, které jsou uvedeny v následujících tabulkách č. 11-12. Pro parametr BER nebyly vytvořeny rovnice z důvodu nízkého počtu měřitelné bitové chybovosti.

Tabulka 11: Koeficienty pro parametr  $E_b/N_0$  při šířce pásma 1 MHz u stropního světla.

	Koeficienty				
	p1	p2	p3	p4	Max. vzdálenost (cm)
4-QAM	6,83E-07	-0,00041413	-0,00021389	39,298	325
8-QAM	5,06E-07	-0,00037249	0,0080674	34,566	250
16-QAM	8,48E-07	-0,00046316	0,016067	31,68	200
32-QAM	1,60E-07	-0,00031581	0,0091286	30,932	150
64-QAM	-2,03E-06	-7,29E-05	0,0022831	29,374	125
128-QAM	-9,60E-06	0,00084914	-0,032314	28,857	100

Tabulka 12: Koeficienty pro parametr EVM při šířce pásma 1 MHz u stropního světla.

	Koeficienty				
	p1	p2	p3	p4	Max. vzdálenost (cm)
4-QAM	3,46E-07	7,83E-05	-0,0032541	2,3119	325
8-QAM	5,94E-07	-2,23E-05	0,0030204	3,098	250
16-QAM	2,08E-07	8,60E-05	-0,0056613	3,3235	200
32-QAM	8,71E-07	-4,55E-05	0,00031746	3,3586	150
64-QAM	2,82E-06	-0,00026375	0,0065069	3,0849	125
128-QAM	6,67E-06	-0,00061371	0,018805	3,2939	100

**10.2.3.1 Ukázka výpočtu** Pokud bychom chtěli zjistit hodnotu odstupů signálu od šumu 16-QAM modulační šířky pásma 1 MHz u stropního světla, tak lze dosadit hodnoty koeficientů z tabulky č. 11

do rovnice č. 22. Výsledek po dosazení a vypočtení lze vidět v následující rovnici.

$$y = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4 = 8,48E-07*100^3 - 0,00046316*100^2 + 0,016067*100 + 31,68 = 29,5 \text{ dB} \quad (23)$$

kde  $y$  je měřený parametr  $E_b/N_0$ ,  $x$  je vzdálenost v centimetrech a  $p1 - p4$  jsou koeficienty.

Výsledný odstup signálu od šumu činí 29,5 dB, což odpovídá přibližně reálné hodnotě, která byla změřena.

## 11 Závěr

Cílem absolventské práce byl návrh, realizace a ověření funkčnosti virtuálního generátoru-analyzátoru digitálně modulovaných signálů (M-QAM, M-PPSK, QFDM, apod.), který bude umožňovat modelování nejčastěji vyskytujících se rušení v reálném bezdrátovém přenosovém kanále. Pomocí programu LabVIEW byly vytvořeny aplikace pro reálné měření a simulování přenosového kanálu s vybranými modely.

V první fázi došlo k reálnému měření, z nichž se získaly důležité informace k modelování (simulování). Pro měření byla zvolena technologie komunikace viditelným světlem. Jako první proběhlo měření se stropním světlem, kde se měnila vzdálenost od středu (fotodetektor umístěný pod světlem) světla do vzdálenosti 350 cm. Největší změřená vzdálenost byla 325 cm u 4-QAM při šířce pásma 1 MHz. Teoretická přenosová rychlost dosahovala 2 Mb/s. S rostoucí šířkou pásma a vyšší modulací (8-QAM až 256-QAM) klesala dosažitelná vzdálenost.

Dále probíhalo měření se zadním brzdovým světlem automobilu. U toho měření byla konstantní délka měření 550 cm. Mezi fotodetektor a světlo byl umístěný box pro simulování meteorologických podmínek o rozměrech 50x50x500 cm. Mezi testované podmínky patřily: mlha, déšť a tepelné turbulence. Z naměřených výsledků bylo zjištěno, že největší negativní vliv na komunikaci má mlha, která způsobovala úplný rozpad komunikace. Dále následoval déšť a tepelné turbulence, které mírně ovlivňovaly komunikaci. Nejvyšší dosažená teoretická přenosová rychlost (max. BER =  $10^{-3}$ ) byla 28 Mb/s u 256-QAM a šířce pásma 4 MHz při prázdném boxu.

V poslední fázi došlo k simulacím. Z výsledků měření je zřejmé, že se nám neprojevuje ve výsledku žádný vyšší fázový šum, vliv odrazů nebo výrazné vychýlení konstelačních bodů od své ideální podoby. Proto byla v simulační aplikaci použita funkce pro přidávání gaussovského šumu. Díky ní se odsimulovala vybraná měření a zjistilo se, že simulované a reálné hodnoty se výrazně neliší. Dále z vytvořených grafů se zjistilo, že rostoucí vzdáleností klesají hodnoty  $E_b/N_0$ , MER a roste EVM. Jednotlivé body byly proloženy regresní křivkou a to kubickou třetího řádu. Tato křivka nejlépe opisovala dané body v grafech. Na základě tohoto se získaly rovnice pro modelování bezdrátového přenosového kanálu.

Při realizaci takové komunikace do skutečného provozu se nabízí využití adaptivních modulací, které mění počet stavů M-QAM modulace na základě stavu komunikačního kanálu. V našem případě by to znamenalo, že s rostoucí vzdáleností od fotodetektoru by se snižoval počet stavů M-QAM a s klesající vzdáleností by narůstal počet stavů M-QAM.

Závěrem lze říct, že komunikace viditelným světlem má velký potenciál a s případnými ekvalizéry jsme schopni dosáhnout dostatečných vzdáleností a přenosových rychlostí v různých podmínkách.

## Literatura

- [1] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [2] MARVIN K. SIMON a Mohamed-Slim ALOUINI. Digital communication over fading channels a unified approach to performance analysis. New York: John Wiley, 2000. ISBN 0471200697.
- [3] SALOUS, Sana. Radio propagation measurement and channel modelling . Chichester, England: Wiley, 2013, 1 online zdroj (xxi, 399 p.).
- [4] PEREZ-FONTAN, F. a P. MARINO-ESPINEIRA. Modeling the wireless propagation channel: a simulation approach with Matlab. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008. ISBN 9780470727850.
- [5] GHASSEMLOOY, Z., W. POPOOLA a S. RAJBHANDARI. Optical wireless communications system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. ISBN 9781439852354.
- [6] HEATH Jr, Robert W. Digital Wireless Communication: Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP . (2012).
- [7] Model rádiového kanálu. Učebnice Teorie Rádiové Komunikace [online]. [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Komunika%E8n%ED\\_kan%E1ly:Model\\_r%E1dio%E9ho\\_kan%E1lu](http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Komunika%E8n%ED_kan%E1ly:Model_r%E1dio%E9ho_kan%E1lu)
- [8] KOPEČNÝ, Jan. Fyzika pro bakaláře. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, 682 s. ISBN 80-248-1200-2.
- [9] Signal to Noise Ratio, SNR. Radio-Electronics.com: resources, analysis and news for electronics engineers [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/rf-noise-sensitivity/receiver-signal-to-noise-ratio.php>
- [10] BER Bit Error Rate Tutorial and Definition. Radio-Electronics.com: resources, analysis and news for electronics engineers [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ber/bit-error-rate-tutorial-definition.php>
- [11] Free Space Path Loss: Details, Formula, Calculator. Radio-Electronics.com: resources, analysis and news for electronics engineers [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/path-loss/free-space-formula-equation.php>

- [12] The Doppler Effect. The Physics Classroom [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/The-Doppler-Effect>
- [13] Multipath Fading. Radio-Electronics.com: resources, analysis and news for electronics engineers [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/multipath/multipath-fading.php>
- [14] Mikrovlnný spoj [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.racom.eu/cz/products/m/ray/calcul.html>
- [15] Radio Wave Propagation & Atmosphere. Radio-Electronics.com: resources, analysis and news for electronics engineers [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/common/atmosphere.php>
- [16] RADIO PROPAGATION MODELS. Wireless Communication [online]. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.wirelesscommunication.nl/slides/prop/propmac.pdf>
- [17] BOHÁČ, Leoš. Optické sítě [online]. Praha: ČVUT [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/161.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf)
- [18] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM). National Instruments [online]. 2014 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en/>
- [19] Metody měření fázového šumu a stability zdrojů signálu. Elektorevue: Časopis pro elektrotechniku [online]. 2006 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/clanky/06025/index.html>
- [20] VITÁSEK, Jan. Optické atmosferické komunikace. Ostrava, 2014. [cit. 2017-02-10].
- [21] KHAN, Latif Ullah. Digital Communications and Networks: Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges [online]. Pakistan, 2016, , 11 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816300335>
- [22] JAIN, Raj Channel Models A Tutorial [online]. In: . 2007 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel\\_model\\_tutorial.pdf](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf)

## **Přílohy na CD**

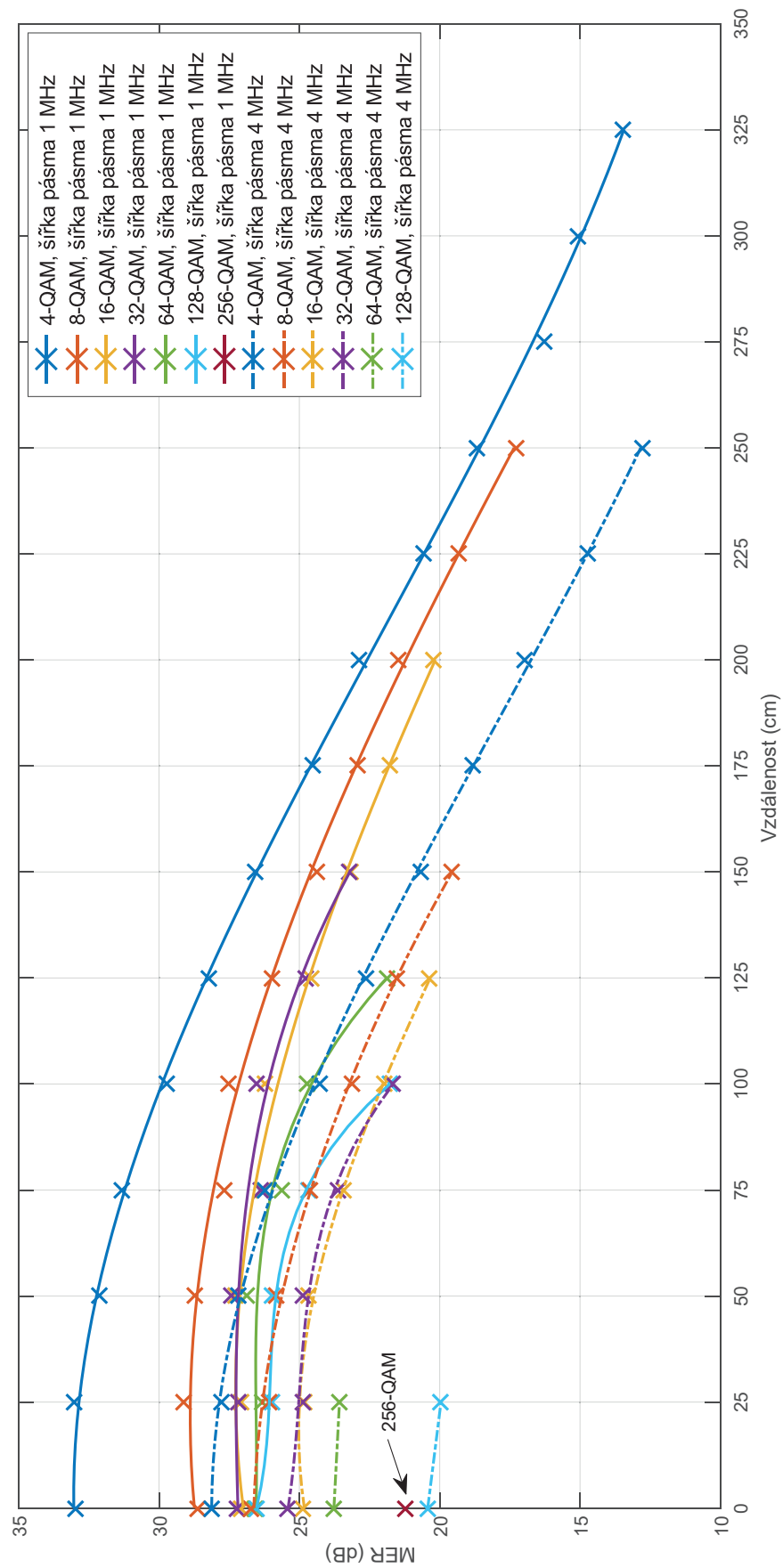
Součástí DP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

1. simulace
2. realne-mereni
3. fortimo-dlm-emea.pdf
4. LR G6SP - Advanced Power TOPLED.pdf
5. Thorlabs PDA36A.PDF
6. NI USRP-2921.pdf

## A Grafy naměřených hodnot - měření na vnitřním stropním světle





Obrázek 83: Závislost MER na vzdálenosti od středu stropního světla pro různé typy M-QAM modulací s šířkami pásma 1 a 4 MHz.

**B Tabulky naměřených hodnot - měření na vnitřním stropním  
světle - šířka pásma 1 MHz**

## 4QAM

Vzdálenost (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
	(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)
0	-0,00198	0,001261	1,729103	-6,74063	950	2000000	0,000075	-0,99025	1,455838	-35,0863	0,826606	-3,53212	2138	39,30346	2,251561	8,126473	4551	0	32,95032
	-0,00101	-0,0013	1,702782	-7,41296	6289	2000000	-0,00027	-1,00856	1,462915	-35,0068	0,829238	-3,42053	9952	39,29089	2,234306	7,432057	6289	0	33,01715
	-0,00223	-0,00657	1,7414	6,765567	1506	2000000	-0,0014	-1,02705	1,454046	-34,9907	0,815914	-2,9728	1232	39,27887	2,249105	6,951913	1506	0	32,9598
	-0,00129	-0,01311	1,732335	-7,1363	5766	2000000	-0,00389	-0,98413	1,46235	-35,0766	0,823966	-3,35357	6500	39,29313	2,25099	7,284904	5766	0	32,95253
	0,000047	-0,00179	1,731261	-6,79057	2686	2000000	0,000224	-0,98408	1,437088	-35,1804	0,835411	3,14854	6655	39,29792	2,263067	8,232478	7062	0	32,90605
	0,00001	0,001059	1,725619	-6,36493	9727	2000000	0,000626	-1,00278	1,464938	-35,0147	0,835423	-3,02318	6766	39,2453	2,258578	6,931925	1148	0	32,9233
	-0,00159	0,008621	1,718929	-6,99581	434	2000000	0,002351	-1,00137	1,488952	-34,9218	0,827011	-3,04241	2857	39,23655	2,244105	7,057947	434	0	32,97914
	-0,00282	0,004216	1,718226	-7,33903	6582	2000000	-0,00084	-1,0031	1,478229	-34,9602	0,818657	-3,33035	1606	39,275	2,234414	7,346049	6582	0	33,01673
	-0,00033	-0,00321	1,729785	-6,94575	977	2000000	-0,00006	-1,00827	1,458311	-35,0262	0,837757	3,654687	525	39,24086	2,264567	7,053363	3590	0	32,9003
	-0,00053	0,006456	1,726258	-6,57954	1207	2000000	-0,00103	-0,97193	1,457685	-35,1293	0,791922	3,125687	6416	39,43499	2,211228	6,911782	1207	0	33,10733
Průměr													39,2897	2,246192				0	32,97126
25	-0,00012	-0,001	1,738304	-7,16027	2745	2000000	0,003754	-1,07504	1,566884	-34,4239	0,806553	-3,04851	4869	39,093	2,236546	7,651588	2745	0	33,00844
	-0,00046	0,00788	1,715523	-6,79723	5221	2000000	-0,00083	-1,0795	1,525244	-34,5697	0,804407	-3,22769	2812	39,17999	2,21664	8,002771	7054	0	33,0861
	-0,00109	0,00324	1,732129	-6,64788	8772	2000000	0,003639	-1,0363	1,530106	-34,6659	0,801764	-3,07794	4197	39,20351	2,22654	6,728732	3998	0	33,04739
	-0,00067	-0,00349	1,732496	-7,92088	9206	2000000	0,006303	-1,07307	1,547682	-34,5016	0,802024	3,154278	316	39,12932	2,227081	7,930698	9206	0	33,04528
	-0,00087	0,003288	1,739228	-7,11207	4726	2000000	0,001688	-1,06715	1,545204	-34,5266	0,797024	-2,90536	2604	39,15856	2,226985	7,179083	4726	0	33,04565
	-0,00154	0,003189	1,712807	-7,37266	7033	2000000	0,003272	-1,06013	1,54483	-34,5465	0,810753	3,114144	7818	39,15376	2,221368	7,41587	7033	0	33,06759
	-0,00151	0,003845	1,717275	-8,05858	6335	2000000	0,00282	-1,0761	1,576699	-34,3843	0,805934	3,442703	3676	39,09455	2,219845	8,074742	6335	0	33,07355
	-0,00109	-0,00261	1,736423	-7,10366	4992	2000000	0,004185	-1,05233	1,541624	-34,5792	0,807732	-3,19517	7324	39,12644	2,23657	7,435729	4992	0	33,00835
	-0,00169	-0,0025	1,746931	-7,79606	6358	2000000	-0,00051	-1,05715	1,555824	-34,5122	0,810374	-3,09961	6122	39,08298	2,247686	7,871625	6358	0	32,96529
	-0,00079	-0,001	1,752002	-7,58083	3381	2000000	0,007631	-1,05752	1,540685	-34,5692	0,803548	3,423447	5692	39,10431	2,244125	7,618335	3381	0	32,97906
-0,00129	0,001461	1,736544	-6,8817	2919	2000000	0,001885	-1,0409	1,53021	-34,6534	0,817143	-3,57284	5836	39,12664	2,246966	6,997936	42	0	32,96807	
-0,00108	-0,00376	1,757851	-7,98384	4409	2000000	-0,00351	-1,052	1,573179	-34,4592	0,803318	-3,07738	6604	39,06416	2,248406	8,081784	4409	0	32,96251	
Průměr													39,12643	2,23323				0	33,02144
50	-0,00031	0,001719	1,863963	-7,30736	547	2000000	-0,00339	-1,31098	1,575864	-33,7654	0,922321	3,159745	632	38,28634	2,462443	7,483753	684	0	32,17268
	-0,00272	0,002805	1,861125	7,310831	4400	2000000	-0,00367	-1,30503	1,58771	-33,7428	0,9291	3,678425	6486	38,27155	2,468258	8,184957	4400	0	32,15219
	-0,00026	0,005776	1,865925	-7,81432	2745	2000000	-0,00243	-1,30147	1,582629	-33,769	0,931066	-4,12898	6571	38,27746	2,474224	7,818339	2745	0	32,13122
	0,001447	0,004527	1,866321	-7,69575	5602	2000000	-0,00229	-1,30632	1,568045	-33,8036	0,925022	-3,97131	8698	38,28521	2,467392	7,944335	5602	0	32,15524
	-0,00268	-0,00469	1,848086	-7,06852	3711	2000000	0,000251	-1,3033	1,570865	-33,8026	0,918531	-3,49162	2058	38,32753	2,446082	7,16582	1164	0	32,23058
	-0,00136	0,013017	1,911758	-7,92195	2222	2000000	-0,00079	-1,30575	1,578459	-33,7711	0,924187	-3,88287	6127	38,22502	2,500866	7,962589	2222	0	32,03819
	-0,00132	0,004054	1,887797	-7,53436	4338	2000000	-0,00294	-1,32844	1,571628	-33,7317	0,906079	-3,78432	5605	38,28099	2,462501	8,119775	206	0	32,17247
	-0,00237	-0,00159	1,891214	-7,26657	3306	2000000	-0,00567	-1,3271	1,570344	-33,7395	0,932494	-3,90996	2710	38,22193	2,494519	8,01023	3306	0	32,06027
	-0,00151	-0,01095	1,878085	-8,67647	1043	2000000	0,000195	-1,303	1,56939	-33,8083	0,922942	-3,89154	9259	38,28565	2,473814	8,736828	1043	0	32,13266
	0,000265	-0,00218	1,904471	-8,61389	4179	2000000	0,001295	-1,30009	1,586021	-33,7616	0,931612	4,255439	1983	38,22523	2,503718	9,001892	4179	0	32,02829
-0,00098	0,000161	1,868444	7,376511	4332	2000000	0,001742	-1,31404	1,598671	-33,6831	0,920708	-3,51153	9203	38,24818	2,463688	7,934288	8978	0	32,16829	
-0,0012	0,001268	1,890381	-7,60205	1733	2000000	0,001453	-1,33184	1,563686	-33,748	0,9202	3,597575	5092	38,24723	2,480004	7,918202	1733	0	32,11095	
Průměr													38,26519	2,474792				0	32,12942

## 4QAM

75	0,00041	0,017747	2,058205	-8,30947	3170	2000000	-0,00028	-1,40506	1,768459	-32,9229	1,032892	4,111174	1119	37,36632	2,735741	8,336759	3170	0	31,2585
	-0,00115	0,001701	2,050275	-7,56209	934	2000000	0,002057	-1,41569	1,801446	-32,7989	1,004307	-3,86824	1857	37,38533	2,697304	8,478986	3044	0	31,3814
	-0,00085	0,002065	2,041264	-8,40033	332	2000000	0,00081	-1,39467	1,773363	-32,9329	1,021519	-4,13936	2685	37,41824	2,710009	8,400374	332	0	31,34059
	-0,00024	-0,00123	2,02702	-8,74772	4820	2000000	0,004394	-1,40789	1,794928	-32,8367	1,03881	-4,47253	596	37,35884	2,719092	9,185522	4820	0	31,31152
	-0,00212	-0,00471	2,052292	-9,48879	628	2000000	0,001897	-1,35446	1,790803	-32,9744	1,026559	3,894088	4811	37,40118	2,72374	9,625401	628	0	31,29669
	-0,00068	-0,0053	2,061517	-8,21195	2090	2000000	0,001211	-1,38745	1,790375	-32,8984	1,029989	-4,16864	9199	37,37013	2,735054	8,477412	2090	0	31,26068
	0,000667	0,002589	2,050892	-8,32867	5039	2000000	0,003397	-1,38723	1,814719	-32,8253	1,013515	-3,94433	3261	37,38035	2,707942	8,42089	5039	0	31,34721
	-0,00022	-0,0079	2,036295	-8,25466	3594	2000000	-0,00067	-1,38603	1,797646	-32,8797	1,031634	-3,99668	9364	37,37253	2,717823	8,854438	3594	0	31,31558
	-0,00158	0,008248	2,044929	-10,2603	5002	2000000	0,006658	-1,39863	1,776729	-32,9133	1,016275	-3,49656	3756	37,41986	2,706637	10,39125	5002	0	31,3514
	-0,00269	0,001408	2,024127	-10,1741	3044	2000000	0,000073	-1,40158	1,802082	-32,83	1,027761	-3,71508	2199	37,38448	2,704128	10,30308	3044	0	31,35946
	-0,0013	0,004272	2,052418	-7,84462	3489	2000000	-0,00061	-1,40518	1,789444	-32,8595	1,023902	3,772006	5737	37,37166	2,720888	7,868568	3489	0	31,30579
	-0,00306	0,002308	2,05482	-9,64378	9206	2000000	-0,00088	-1,40129	1,773303	-32,9173	1,016557	3,805877	3633	37,40518	2,714475	9,643993	9206	0	31,32628
	-0,00187	0,006309	2,042128	-10,155	7923	2000000	0,001214	-1,39183	1,792246	-32,8825	1,025786	4,174778	3767	37,37028	2,715568	10,15755	7923	0	31,32279
Průměr														37,38495	2,716031			0	31,32138
100	-0,00224	0,008146	2,422478	-9,45592	2342	2000000	0,001784	-1,71954	2,40163	-30,5925	1,243822	5,03333	8996	35,60705	3,252055	10,99668	2342	0	29,75684
	0,000125	-0,00435	2,419576	-8,96153	5587	2000000	0,001387	-1,77565	2,410576	-30,4751	1,241567	-5,09149	846	35,55904	3,246806	9,658663	9939	0	29,77087
	-0,0008	-4,7E-05	2,445289	-9,85682	2322	2000000	0,000493	-1,72346	2,381811	-30,6332	1,242559	-5,1759	6368	35,59407	3,267641	10,84831	4421	0	29,71531
	-0,00198	-0,00602	2,43051	-9,59588	836	2000000	-0,0037	-1,73013	2,424557	-30,5199	1,241728	-5,08981	306	35,56871	3,255702	9,881287	5553	0	29,74711
	0,000302	-0,00756	2,420714	-9,12451	9102	2000000	0,005603	-1,70268	2,405262	-30,6126	1,226293	-4,30841	8844	35,64792	3,230017	10,25455	9102	0	29,81591
	0,000776	0,001391	2,443711	-9,3259	5795	2000000	0,004927	-1,70456	2,438798	-30,529	1,243356	-4,71088	8679	35,56198	3,266906	9,868639	5795	0	29,71727
	0,001064	0,014107	2,390535	8,873744	5418	2000000	-0,0041	-1,70808	2,455623	-30,4829	1,247654	5,017066	7896	35,56635	3,233089	9,492307	9493	0	29,80765
	-0,00109	0,003738	2,40917	9,706711	2801	2000000	-0,00115	-1,74972	2,448084	-30,4313	1,239485	-5,33315	5685	35,53605	3,236688	9,996079	5685	0	29,79798
	0,000663	-0,01029	2,418475	-9,69494	7994	2000000	0,003876	-1,69739	2,405706	-30,6205	1,24921	5,222943	103	35,60919	3,255209	9,702287	7994	0	29,74842
	-0,00451	0,023647	2,420061	-8,99739	4726	2000000	0,003269	-1,72278	2,442558	-30,4895	1,252765	4,653493	4734	35,55556	3,260722	9,412114	8611	0	29,73373
	0,002434	0,010983	2,415231	-8,6997	2818	2000000	-0,00151	-1,70798	2,438059	-30,525	1,242246	-4,61355	6698	35,58917	3,24457	9,969283	2686	0	29,77686
	-0,0006	-9,6E-05	2,438312	9,099935	5052	2000000	0,005524	-1,69887	2,394273	-30,6456	1,254786	5,282779	6790	35,59888	3,276404	9,40006	831	0	29,69205
	-0,00312	-0,00117	2,43762	-11,2132	7457	2000000	0,006623	-1,71668	2,399302	-30,603	1,247305	-5,00179	5615	35,59591	3,267216	11,63527	7457	0	29,71644
Průměr														35,58384	3,25331			0	29,75357
125	-0,00175	0,01043	2,8065	13,07704	1604	2000000	0,001817	-2,51309	2,599191	-28,8368	1,543293	6,068853	1875	33,90736	3,888274	13,26147	1604	0	28,20486
	-0,00104	0,011628	2,802837	12,88341	1219	2000000	0,004129	-2,48164	2,540698	-28,9916	1,53716	-6,17468	6117	34,00373	3,878421	12,89422	1219	0	28,2269
	-0,00313	-0,0029	2,853747	-10,8124	6057	2000000	-0,00156	-2,5157	2,59605	-28,8378	1,525062	-6,6987	6294	33,92238	3,900496	12,20237	6294	0	28,1776
	-0,00102	0,001455	2,820684	-12,8587	1455	2000000	0,001295	-2,57584	2,579432	-28,7653	1,513319	5,416713	1425	33,90143	3,862504	13,66564	1455	0	28,26262
	-0,00114	-0,00627	2,84819	-11,4142	4338	2000000	-0,00171	-2,52204	2,596496	-28,8265	1,522105	-5,83975	7030	33,90351	3,893633	11,76791	6802	0	28,1929
	-0,0021	0,000937	2,830506	11,05653	5494	2000000	0,001578	-2,52281	2,640964	-28,7487	1,526492	5,906543	6137	33,87319	3,885507	11,23289	2147	0	28,21105
	-0,00143	0,012069	2,868826	-10,6153	7760	2000000	-0,00027	-2,5275	2,572181	-28,8591	1,52346	-6,24952	4961	33,89798	3,909598	11,03486	4961	0	28,15736
	-0,00057	0,000749	2,831345	-12,1631	5293	2000000	-0,00416	-2,51635	2,560285	-28,8985	1,522496	5,793443	7669	33,94226	3,881038	12,53243	5293	0	28,22104
	-0,0009	-0,0023	2,839572	-11,0956	9037	2000000	-0,00166	-2,53844	2,58847	-28,8128	1,53976	-6,08048	4345	33,87906	3,907395	11,84329	9037	0	28,16225
	-0,00128	-0,00249	2,856539	-10,2623	8780	2000000	-0,00315	-2,57538	2,599931	-28,7315	1,519628	-6,34526	2059	33,85833	3,896223	11,32238	2059	0	28,18713
Průměr														33,90892	3,890309			0	28,20037

## 4QAM

150	-0,00125	0,012638	3,428572	-12,86	1969	2000000	0,004054	-2,76416	3,11489	-27,6087	1,850956	7,201361	8143	32,43495	4,707964	13,12291	1969	0	26,54334
	-0,00272	0,003681	3,350781	14,85256	2151	2000000	-0,00325	-2,75069	3,096537	-27,6561	1,843572	-8,15886	3508	32,52336	4,642145	15,01673	2151	0	26,66563
	-0,00376	-0,01436	3,388571	-12,5874	5947	2000000	-0,00174	-2,76284	3,069393	-27,6816	1,843583	7,002771	8969	32,51405	4,66904	14,30295	5947	0	26,61545
	-0,00021	0,011727	3,380547	-12,196	5878	2000000	-0,00219	-2,74596	3,108251	-27,6443	1,860082	8,84195	3806	32,48289	4,683378	16,95598	3806	0	26,58882
	-0,00518	-0,00025	3,368425	-13,9142	8996	2000000	-0,00285	-2,81603	3,078824	-27,5922	1,833846	7,256496	7418	32,48615	4,643464	13,9672	8996	0	26,66316
	-0,0002	-0,01012	3,361821	-14,2423	3697	2000000	-0,00436	-2,7491	3,11644	-27,6271	1,828925	-7,15185	9703	32,49333	4,633357	15,93867	3697	0	26,68209
	0,001621	0,029764	3,390209	-13,1438	1980	2000000	0,000757	-2,79899	3,143518	-27,5163	1,828298	7,177488	6902	32,43944	4,652902	13,77118	6126	0	26,64552
	0,000058	-0,01449	3,459515	-13,1524	967	2000000	0,000505	-2,75003	3,06556	-27,7057	1,84867	-7,03033	5156	32,47309	4,727448	15,76867	4523	0	26,50747
	0,000644	-0,0223	3,397929	-13,542	7922	2000000	0,00919	-2,84154	3,118316	-27,4962	1,857405	7,064807	7301	32,41298	4,693855	15,07639	4027	0	26,56941
	-0,0009	0,003307	3,466858	-15,384	139	2000000	0,004778	-2,80397	3,080627	-27,6064	1,844904	7,278572	6134	32,4368	4,727918	15,6007	139	0	26,5066
	0,001851	-0,00477	3,462935	-13,8655	3171	2000000	-0,0056	-2,84138	3,087124	-27,5439	1,841986	8,970897	4308	32,40325	4,72164	16,58503	4308	0	26,51814
	Průměr													32,46366	4,682101			0	26,59142
175	-0,00538	0,034848	4,206014	-17,4303	3949	2000000	0,005968	-4,0575	3,971033	-24,9171	2,402001	-9,65429	4296	30,151	5,931473	17,91643	3949	0	24,53675
	0,002024	-0,03934	4,301095	17,39222	9033	2000000	-0,00589	-3,99899	3,898227	-25,0601	2,405346	10,23489	4157	30,14859	6,003226	20,87297	8373	0	24,43231
	0,001605	-0,0171	4,251935	-16,3388	6684	2000000	-0,01359	-4,04677	3,920342	-24,9832	2,397615	11,21911	966	30,15348	5,959198	19,90026	966	0	24,49624
	-0,0033	-0,00724	4,28065	-16,7171	6827	2000000	0,002896	-4,03507	4,027495	-24,8808	2,381604	9,561528	6409	30,09891	5,961132	18,25741	6409	0	24,49343
	-0,00191	-0,01028	4,246419	19,76883	2912	2000000	-0,00482	-4,03616	3,917904	-24,9976	2,369197	-10,0378	3776	30,18236	5,920197	20,67906	2912	0	24,55328
	-0,00072	-0,03396	4,218179	17,62902	4198	2000000	0,000421	-3,98211	3,961863	-25,0095	2,388938	8,997544	4258	30,18964	5,925977	17,76928	4198	0	24,5448
	-0,00435	0,006863	4,221652	-17,8826	4341	2000000	-0,00531	-4,07699	4,036453	-24,8261	2,402315	-8,6899	4352	30,08179	5,942659	17,89317	4341	0	24,52038
	-0,00526	0,000375	4,203832	15,09125	7181	2000000	0,005441	-4,07247	3,977147	-24,8942	2,392005	-8,68421	9399	30,14039	5,919943	16,44767	966	0	24,55365
	0,001149	0,00417	4,292	-15,5719	8324	2000000	0,013101	-3,99253	3,982053	-24,9761	2,39835	-10,0538	9064	30,12684	5,988145	18,35032	9064	0	24,45415
	-0,00438	0,023414	4,251702	17,37825	3882	2000000	-0,01168	-4,0626	3,976834	-24,9053	2,38011	-9,29868	7693	30,123	5,939633	17,8066	121	0	24,52481
	-0,00366	0,014682	4,285598	16,53778	5538	2000000	-0,00866	-4,03094	3,898494	-25,0242	2,366869	11,77174	6122	30,1852	5,945194	20,48416	6122	0	24,51668
	0,001575	-0,00157	4,276278	-16,2519	7976	2000000	0,008583	-3,96857	3,96994	-25,0155	2,346914	10,8793	9349	30,21149	5,914897	18,91005	9349	0	24,56106
	Průměr													30,14939	5,945973			0	24,51563
200	-0,00202	-0,01853	5,0988	21,69196	2998	2000000	-0,00563	-4,73704	4,717987	-23,497	2,88725	-11,051	1097	28,60721	7,156593	21,81909	2998	0	22,90587
	-0,00363	-0,00538	5,159689	-21,1186	8720	2000000	-0,00615	-4,7011	4,658021	-23,5855	2,871515	11,89313	4050	28,62615	7,182351	23,54305	428	0	22,87467
	0,000637	-0,00205	5,20435	19,85286	6019	2000000	0,002602	-4,65348	4,680418	-23,609	2,872671	-12,3828	6831	28,61076	7,216772	21,58078	6409	0	22,83314
	-0,00432	-0,00933	5,177872	21,51157	1808	2000000	0,002816	-4,66766	4,755424	-23,5261	2,879904	13,22543	8380	28,58285	7,205565	23,68259	8380	0	22,84664
	-0,00332	0,015887	5,128137	-21,2861	771	2000000	0,001828	-4,73656	4,665619	-23,5455	2,882596	-11,0883	1345	28,60457	7,173407	21,36983	771	0	22,88549
	-0,0034	-0,01565	5,156739	-19,5019	1176	2000000	-0,00429	-4,62516	4,667326	-23,6476	2,85716	10,11618	6996	28,67269	7,163495	21,94086	425	0	22,8975
	-0,00553	0,00537	5,163065	19,593	5253	2000000	-0,00858	-4,65473	4,732669	-23,5591	2,90672	10,82097	977	28,57449	7,227374	21,75732	3526	0	22,82039
	-0,00188	0,015738	5,093136	-21,6706	2012	2000000	0,003116	-4,71175	4,809032	-23,4364	2,90097	11,69841	1203	28,5678	7,16974	21,7745	9122	0	22,88993
	-0,00191	0,001179	5,191837	20,24903	5597	2000000	0,01738	-4,73273	4,718689	-23,5004	2,866757	11,16059	1935	28,55795	7,198675	22,04546	1935	0	22,85495
	-0,00601	0,018165	5,141659	-20,4468	9706	2000000	-0,00028	-4,63833	4,658314	-23,6438	2,897238	10,61145	4280	28,64948	7,200226	21,43607	9706	0	22,85308
	-0,00165	-0,00629	5,140923	-19,9068	7050	2000000	0,004217	-4,64175	4,696357	-23,605	2,926863	-11,1089	1436	28,60314	7,236733	21,16069	3846	0	22,80915
	Průměr													28,60519	7,193721			0	22,86098
	-0,00156	0,020963	6,686146	-26,7254	9102	2000000	0,000217	-6,85358	5,929319	-20,8551	3,764784	-14,9611	8880	26,10429	9,350601	28,38367	1749	0	20,58321
	-0,00615	0,023635	6,653288	-28,8884	4013	2000000	-0,0133	-6,97389	5,912617	-20,7782	3,775184	14,1898	9057	26,08705	9,335764	28,88945	4013	0	20,597
	-0,00559	0,090765	6,599118	-25,6925	4224	2000000	-0,01015	-7,12802	5,957875	-20,6396	3,820807	15,83466	3015	26,00424	9,355965	27,7712	3015	0	20,57823

## 4QAM

225	-0,00529	0,026291	6,681522	-29,2733	3049	2000000	0,00096	-6,9537	5,984026	-20,7488	3,778036	-14,3822	8360	26,042	9,360063	29,29231	3282	0	20,57442
	-0,01232	0,004924	6,711534	-27,8042	4010	2000000	0,00489	-7,00962	5,851733	-20,7895	3,806021	18,12586	9510	26,04219	9,414084	31,96539	9510	0	20,52444
	-0,01141	0,03594	6,627019	27,50089	7552	2000000	0,008919	-7,08542	6,000955	-20,6442	3,782874	-15,0021	5379	26,02307	9,326454	28,43395	7552	0	20,60567
	-0,00667	-0,00537	6,632179	-27,7527	4263	2000000	0,028457	-6,96644	6,02493	-20,7145	3,779886	15,17107	3978	26,04173	9,326328	29,55922	4044	0	20,60579
	-0,0056	-0,01541	6,707834	26,56415	2341	2000000	0,01678	-7,12594	5,918496	-20,6647	3,797407	-14,6566	3771	25,98601	9,401387	27,37671	9828	0	20,53616
	-0,00104	0,00528	6,719884	-26,3909	4244	2000000	0,012466	-7,07357	5,922297	-20,7002	3,791636	15,50693	3517	26,01471	9,401013	29,10544	4830	0	20,53651
	-0,00305	-0,04689	6,653052	-26,9327	7801	2000000	-0,00142	-6,99698	5,996767	-20,71	3,808104	-15,5489	2537	26,02776	9,376941	28,32285	5654	0	20,55878
	Průměr													26,0373	9,36486			0	20,57002
	-0,00288	0,024968	8,292333	29,99387	5166	2000000	0,021674	-9,13001	7,251413	-18,6665	4,728149	-18,2085	4627	24,02574	11,64812	34,84858	5166	0	18,67488
	-0,00145	0,038638	8,350303	30,16762	1529	2000000	-0,01316	-8,9298	7,115809	-18,848	4,723789	20,9783	2873	24,09461	11,686	37,01563	4952	0	18,64668
250	-0,00544	-0,00946	8,197286	-32,8037	6751	2000000	0,006327	-8,86201	7,308648	-18,7959	4,644168	-18,4882	1837	24,1477	11,47826	35,29175	6751	0	18,80248
	-0,00074	0,038092	8,352312	-32,1025	2111	2000000	0,00573	-8,96634	7,135894	-18,8168	4,745583	19,52181	5552	24,08257	11,7045	35,67054	1204	0	18,63295
	-0,00707	0,011291	8,255303	-35,3892	9152	2000000	0,017208	-8,89585	7,231658	-18,813	4,724853	-21,5195	4907	24,09361	11,6202	41,24321	4907	0	18,69573
	-0,00468	0,040101	8,266446	-34,1236	160	2000000	-0,00228	-9,06162	7,288568	-18,6891	4,749429	-19,0676	538	24,02493	11,65255	36,66598	9561	0	18,67158
	-0,00269	0,026118	8,364888	-31,6996	2406	2000000	-0,0037	-8,87533	7,095067	-18,8904	4,75919	-16,8826	1823	24,12335	11,73183	38,59703	8921	0	18,61269
	-0,00853	-0,0396	8,302338	-32,6706	149	2000000	0,011986	-8,97425	7,303978	-18,7327	4,743185	18,84498	3157	24,04961	11,66911	32,75808	3759	0	18,65924
	-0,00231	0,012081	8,281285	-33,6331	1869	2000000	-0,04062	-9,08456	7,265278	-18,6866	4,71681	18,76804	2916	24,03855	11,6267	33,63327	1869	0	18,69087
	Průměr													24,07563	11,64636			0	18,67634
	-0,00251	0,032022	10,71671	-39,4396	9162	2000000	-0,01953	-11,7032	10,11653	-16,2104	6,25822	-32,5528	6320	21,58617	15,18047	53,87005	6320	0	16,3743
	-0,01247	0,140286	10,94768	-40,3096	9239	2000000	-0,03053	-11,6051	10,4745	-16,1191	6,362592	-25,7328	4587	21,45163	15,47035	44,57237	8195	0	16,21
275	0,011979	-0,00466	10,85499	43,12875	3099	2000000	-0,01978	-12,0185	9,980971	-16,125	6,295852	24,41168	6048	21,50316	15,32097	43,43363	3099	0	16,29427
	0,011104	0,05057	10,7184	43,53776	3556	2000000	-0,00597	-11,6536	10,19131	-16,2039	6,326474	24,46699	4274	21,55569	15,26918	51,16941	3556	0	16,32369
	-0,00366	0,019385	10,87499	-42,5248	2713	2000000	0,009634	-11,5068	10,3382	-16,2109	6,282962	23,78001	2958	21,53788	15,31109	44,67995	2838	0	16,29988
	-0,00235	-0,02428	10,74364	-43,0521	2206	2000000	-0,04919	-11,2251	10,47926	-16,2742	6,334883	25,65449	6362	21,58397	15,29677	47,9337	2206	0	16,30801
	0,008549	-0,01779	10,74486	-45,195	4466	2000000	0,033682	-11,7046	10,35207	-16,1232	6,332426	-24,6814	4665	21,50153	15,2808	54,89184	4466	0	16,31708
	-0,01625	0,085461	10,86577	-44,0573	3938	2000000	0,010451	-11,4671	10,39805	-16,2049	6,324323	-24,3867	9243	21,53794	15,35951	48,57873	3938	0	16,27245
	-0,00292	0,011844	10,82283	-44,8888	433	2000000	-0,01628	-11,3483	10,3478	-16,2734	6,379188	-26,507	9548	21,55824	15,39997	45,17462	433	0	16,2496
	-0,01023	-0,0116	10,84266	-43,9844	1025	2000000	-0,03272	-11,5202	10,51157	-16,1402	6,242208	-25,3432	2680	21,52333	15,25057	44,61045	1025	0	16,33428
	-0,00597	-0,03511	10,88669	-43,038	5997	2000000	-0,00567	-11,399	10,55016	-16,1754	6,405842	-28,4227	7510	21,48403	15,47423	48,9077	7510	0	16,20782
	Průměr													21,52941	15,32854			0	16,29013
	-0,00699	0,002009	12,56353	-57,496	8359	2000000	0,01467	-12,5589	11,20409	-15,4782	7,380779	-30,5408	1241	20,47217	17,80731	57,49623	8359	0	14,98804
	-0,00133	0,021016	12,45702	-47,0628	8995	2000000	0,017589	-12,6952	10,87552	-15,537	7,40513	30,43593	8487	20,51158	17,76934	55,59284	8487	0	15,00657
	-0,00635	0,012994	12,32269	-54,6582	9507	2000000	-0,01382	-12,3284	11,21518	-15,5631	7,314234	29,35729	3960	20,57878	17,57238	55,65198	9507	0	15,10339
	-0,0057	-0,0477	12,5942	-50,5728	990	2000000	0,007016	-12,4593	10,971	-15,5973	7,385739	-29,4321	1650	20,52765	17,82624	56,91937	2373	0	14,97881
	-0,00342	0,077832	12,387	56,59952	2903	2000000	-0,00898	-12,2166	11,03648	-15,6695	7,36557	-31,6381	8620	20,60571	17,66551	57,1071	2903	0	15,05748
	0,002714	-0,0121	12,54184	54,28581	1954	2000000	-0,0029	-12,2483	10,96503	-15,6823	7,265994	-28,809	6552	20,60732	17,65969	54,76584	8431	0	15,06034
	-0,01177	-0,04601	12,41272	47,82529	8475	2000000	-0,01564	-12,297	11,17458	-15,5895	7,347369	-35,3347	1932	20,56079	17,65428	58,67445	1932	0	15,063
	0,003172	-0,0373	12,38024	-55	6220	2000000	0,019642	-12,3004	10,82948	-15,7093	7,250449	-61,071	8259	20,6707	17,52337	95,38811	8259	0	15,12765
	0,008558	0,007603	12,39238	-53,7832	6134	2000000	-0,00101	-12,2613	11,22924	-15,5841	7,379799	-38,2096	3523	20,56634	17,66757	62,21193	3523	0	15,05647
	-0,00533	-0,02068	12,4377	-48,3736	4947	2000000	0,02908	-12,3307	10,98864	-15,6416	7,417349	-29,8946	9970	20,55518	17,76065	50,76216	4947	0	15,01083
	0,002067	0,072035	12,33669	48,78881	8871	2000000	0,011448	-12,4002	11,1392	-15,562	7,245143	-29,6158	354	20,59565	17,48025	50,16123	354	0	15,14905

## 4QAM

300 Průměr	-0,00846	0,025956	12,26901	-47,7306	68	2000000	0,046251	-12,3554	11,07185	-15,6029	7,432403	-30,4784	1843	20,57341	17,6735	51,69286	9223	0	15,05355
	-0,00508	0,008052	12,50304	-49,5318	8810	2000000	-0,00186	-12,3108	11,33648	-15,5273	7,366041	-32,6444	1404	20,51037	17,75486	59,47788	6954	0	15,01366
	-0,00381	-0,05005	12,61026	-53,3775	1251	2000000	0,03006	-12,0302	11,39831	-15,6122	7,357289	29,47163	4292	20,52748	17,81202	55,00564	1251	0	14,98574
														20,56165	17,68764			0	15,04675
325 Průměr	-0,00361	0,003236	14,93288	-57,4438	2845	2000000	-0,02776	-15,7317	11,20328	-14,2829	9,116527	-72,8149	4343	18,98322	21,43746	113,9185	4343	0,000552	13,37653
	-0,00733	0,101979	14,77801	57,00682	584	2000000	0,006885	-15,7093	11,18115	-14,2969	8,9929	-77,2012	3777	19,06739	21,1693	124,0466	5099	0,000502	13,48587
	-0,02624	-0,01402	14,73757	-54,508	8313	2000000	0,00925	-15,6864	11,42559	-14,2411	8,869968	-69,231	7966	19,04653	21,02023	108,5083	3297	0,000351	13,54725
	0,008466	0,051924	14,61408	57,39893	2668	2000000	0,004468	-15,6994	11,50211	-14,2162	8,904213	-68,882	989	19,03806	20,98533	109,2851	989	0,000351	13,56168
	-0,00883	0,037585	14,73043	-58,4075	4372	2000000	-0,00309	-15,5108	11,41101	-14,3087	9,347905	-92,0413	725	18,98433	21,46289	135,9381	725	0,001003	13,36624
	-0,0066	0,019127	14,74029	-55,5918	5371	2000000	-0,00221	-16,069	11,14446	-14,1747	8,954717	-72,1942	8604	19,00679	21,1243	117,1721	8604	0,000301	13,50435
	-0,01475	0,0541	14,9121	-66,1291	3909	2000000	0,021984	-15,9461	11,31361	-14,1762	8,911446	-71,7488	5580	18,99242	21,17359	97,24236	5580	0,000201	13,48411
	-0,01261	0,075536	14,65917	56,87005	4187	2000000	0,019676	-15,9067	11,5427	-14,1312	9,121786	-72,3775	8086	18,94921	21,22806	105,6002	5808	0,000502	13,46179
	-0,00249	0,110692	14,5904	-55,7653	884	2000000	-0,04041	-15,7567	11,11973	-14,2955	8,993627	-72,1375	3003	19,07989	21,03779	105,7168	4246	0,000351	13,54
	-0,00172	0,094724	14,87186	-59,629	6435	2000000	0,003071	-15,9528	10,93189	-14,2713	8,854984	-70,8044	8177	19,02342	21,12229	105,718	8177	0,00015	13,50518
	-0,00148	0,036082	14,45187	56,84555	6508	2000000	-0,01245	-15,9476	11,23255	-14,1965	9,07635	-92,4867	2277	19,01282	21,03696	138,8844	2281	0,000602	13,54034
	-0,00124	0,082578	14,64235	-64,0382	217	2000000	-0,01172	-15,9986	11,29399	-14,1623	8,899013	-74,6117	1828	19,02026	20,94187	114,8257	1827	0,000401	13,57969
	-0,02923	0,164248	14,67125	-59,2846	4221	2000000	-0,01723	-15,8353	10,91884	-14,3182	9,057949	-74,541	6362	19,05117	21,17197	112,5183	3506	0,000552	13,48478
	0,00092	0,077163	14,6962	-55,1808	8389	2000000	0,00172	-15,9121	11,13541	-14,2344	8,969283	-69,7118	8309	19,04681	21,08345	117,1501	8309	0,000401	13,52117
	-0,01452	-0,05895	14,78681	-60,2426	1405	2000000	0,001134	-15,8568	11,38312	-14,1906	9,080246	-71,8477	7577	18,9715	21,28439	115,9586	1828	0,000502	13,43877
	-0,00168	0,029012	14,79999	-60,4281	3051	2000000	-0,0191	-15,7796	11,29113	-14,2425	8,783576	-59,914	965	19,05991	21,00415	98,38564	965	0,0001	13,5539
														19,02086	21,14275			0,000426	13,49698

## 8QAM

Vzdálenost (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
	(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)
0	-0,00287	0,010241	3,332645	11,487207	4146	3E+06	0,129378	-1	1,4	-35,36451	1,23	-4,97	6128	34,4253	3,2222	9,38	9062	0	28,58294
	0,002277	-0,018888	3,312474	11,898178	7585	3E+06	0,130851	-1	1,4	-35,37127	1,24	-4,45	6535	34,4421	3,21652	9,61	3779	0	28,59824
	-0,00093	-0,001478	3,28229	11,305631	5784	3E+06	0,129602	-1	1,4	-35,33655	1,26	-4,78	4936	34,42891	3,21525	9,5	8990	0	28,60169
	-0,00358	-0,001638	3,287742	11,260674	8344	3E+06	0,138419	-1	1,4	-35,36698	1,23	-4,62	2607	34,45016	3,20522	9,21	7523	0	28,62882
	-0,00031	0,003091	3,242648	12,234688	5889	3E+06	0,129795	-1	1,4	-35,29174	1,24	-4,82	7799	34,48436	3,17764	9,35	1156	0	28,70388
	-0,00202	-0,007484	3,340977	12,308773	3643	3E+06	0,140775	-1	1,4	-35,34795	1,24	-4,65	9084	34,3898	3,23932	9,27	3542	0	28,53689
	-0,00027	-0,002605	3,281409	12,09704	597	3E+06	0,133239	-1	1,4	-35,29432	1,25	-4,24	6277	34,4374	3,20839	9,12	2230	0	28,62024
	-0,00041	-0,001405	3,320219	11,177081	696	3E+06	0,134403	-1	1,4	-35,40372	1,24	-5,4	969	34,42444	3,23188	9,38	428	0	28,55687
	-0,00057	-0,006941	3,261986	11,202016	5031	3E+06	0,138482	-1	1,4	-35,39657	1,26	-6,19	2948	34,46652	3,20335	9,83	7473	0	28,63388
	-0,00257	0,001256	3,354419	11,704737	9805	3E+06	0,135574	-1	1,4	-35,3924	1,21	-4,19	9393	34,4314	3,22806	8,99	57	0	28,56714
Průměr													34,43804	3,21478			0	28,60306	
25	-0,00119	0,003109	3,282835	12,178761	6709	3E+06	0,130824	-1	1,5	-34,75199	0,97	-4,56	4306	34,74629	2,9892	9,23	9110	0	29,23488
	-0,00148	0,009921	3,310594	10,657583	614	3E+06	0,140225	-1	1,5	-34,7786	0,99	-4,5	9729	34,69931	3,01646	8,8	57	0	29,15603
	-0,00121	0,005672	3,292011	11,429887	686	3E+06	0,137075	-1	1,5	-34,84809	0,99	4,01	8468	34,73908	3,00439	9,82	401	0	29,19086
	-0,00131	0,017287	3,342264	11,019382	9974	3E+06	0,137846	-1	1,5	-34,8281	0,98	-4,48	3109	34,68153	3,03462	9,37	2870	0	29,1039
	-0,00083	0,015257	3,326298	12,177361	2455	3E+06	0,135901	-1	1,5	-34,89767	0,98	4,61	1075	34,73183	3,02843	9,05	9882	0	29,12162
	-0,00152	0,018675	3,306846	11,736321	9977	3E+06	0,14194	-1	1,5	-34,80164	0,98	4,6	4495	34,71654	3,00871	8,54	3465	0	29,17837
	-0,00121	0,015911	3,354389	11,927635	3663	3E+06	0,136728	-1	1,5	-34,94456	0,98	-4,3	7085	34,69709	3,04518	9,23	8863	0	29,07372
	-0,00115	0,006768	3,320527	10,826832	7354	3E+06	0,13714	-1	1,5	-34,89142	0,97	-4,26	2026	34,74521	3,01619	9,89	4635	0	29,15681
	-0,0015	-0,000013	3,334937	11,002318	9705	3E+06	0,137152	-1	1,5	-34,77701	0,97	3,82	2846	34,69054	3,02446	8,95	7408	0	29,13302
	-0,00173	0,021247	3,323408	11,41521	958	3E+06	0,13356	-1	1,5	-34,96315	0,98	-4,09	3273	34,73959	3,02278	9,19	3779	0	29,13783
-0,0016	0,013177	3,367573	11,310873	3569	3E+06	0,140132	-1	1,5	-34,89798	0,98	3,76	8325	34,66294	3,05082	10,3	57	0	29,05765	
-0,0021	0,010141	3,359939	11,494746	7470	3E+06	0,14168	-1	1,5	-34,88071	0,98	4	2977	34,68635	3,03867	10,4	3165	0	29,09231	
-0,00223	0,009533	3,349876	10,697353	3043	3E+06	0,142755	-1	1,5	-34,86283	0,99	4,51	4045	34,66719	3,04979	8,9	8990	0	29,06057	
-0,00126	0,012374	3,349322	11,057738	2421	3E+06	0,137016	-1	1,5	-34,85029	0,96	4,62	4521	34,7078	3,02425	9,64	3535	0	29,13361	
Průměr													34,70795	3,02528			0	29,1308	
	0,000214	0,009272	3,416528	12,273322	8006	3E+06	0,138042	-1	1,5	-34,17178	1,1	-4,49	4057	34,19273	3,17932	10,7	3890	0	28,69928
	-9,6E-05	-0,006482	3,391116	12,465366	371	3E+06	0,132815	-1	1,5	-34,122	1,1	-4,34	6782	34,21619	3,16349	10,1	5619	0	28,74264
	-0,00038	0,004605	3,392238	12,303625	2953	3E+06	0,135201	-1	1,5	-34,10749	1,08	-4,18	3416	34,22645	3,14995	10,4	8015	0	28,77991
	-0,00095	0,002124	3,419787	12,877679	2634	3E+06	0,132682	-1	1,5	-34,04609	1,1	-4,08	5940	34,15876	3,18014	9,69	2634	0	28,69706
	0,001041	-0,001177	3,38759	11,718039	5521	3E+06	0,135275	-1	1,5	-34,12383	1,1	-4,6	7135	34,20012	3,17025	9,84	7741	0	28,7241
	-0,00072	0,005212	3,398972	14,047307	2968	3E+06	0,132748	-1	1,5	-34,28969	1,09	-4,72	15	34,26058	3,16563	10,4	7167	0	28,73677
	0,000581	0,001924	3,419381	13,895103	4242	3E+06	0,134732	-1	1,5	-34,25383	1,09	-4,73	7577	34,21624	3,17664	9,86	4242	0	28,70662
	-0,00217	-0,005874	3,414036	12,182902	8398	3E+06	0,138157	-1	1,5	-34,28545	1,1	-5,06	50	34,21354	3,17993	9,39	2493	0	28,69762
	-0,0009	0,012266	3,415899	13,727539	3336	3E+06	0,13736	-1	1,5	-34,07699	1,08	-4,35	9954	34,1691	3,17176	9,78	5572	0	28,71998
	-0,00065	0,016553	3,435557	13,416435	9758	3E+06	0,13479	-1	1,6	-33,91805	1,08	-4,42	3448	34,11607	3,18424	10,2	7384	0	28,68586



## 8QAM

50	-0,00384	0,014018	3,43311	11,896395	9467	3E+06	0,134181	-1	1,5	-34,18575	1,08	-4,44	2762	34,1808	3,18318	9,08	3779	0	28,68874
Průměr														34,19551	3,17314			0	28,71623
	-0,00294	0,008644	3,91648	13,463232	8953	3E+06	0,167613	-1	1,7	-33,262	1,21	-5,94	7160	33,18807	3,58469	10	8626	0	27,65694
	-0,00122	0,006673	3,889404	14,260118	709	3E+06	0,159463	-1	1,7	-33,19078	1,2	-5,32	9795	33,19601	3,56715	10,5	709	0	27,69955
	-0,0006	0,009703	3,874409	13,116802	4964	3E+06	0,160686	-1	1,8	-33,11026	1,2	5,37	8073	33,19072	3,55493	11,5	5572	0	27,72935
	-0,00017	0,009404	3,881099	14,416495	1075	3E+06	0,168562	-1	1,7	-33,21323	1,2	-4,95	2156	33,20817	3,55763	10,6	3077	0	27,72277
	0,000459	0,005203	3,8824	14,704177	4497	3E+06	0,162899	-1	1,7	-33,21579	1,19	-4,76	9637	33,22463	3,55541	11,9	9110	0	27,72817
	-0,00099	0,005017	3,861891	13,715966	285	3E+06	0,17093	-1	1,7	-33,10953	1,19	-4,66	1067	33,21635	3,54417	11,3	5292	0	27,75569
	-9,3E-05	0,006932	3,964428	15,272824	7141	3E+06	0,169657	-1	1,7	-33,1544	1,2	5,26	2999	33,12698	3,61067	11,1	7141	0	27,59423
	0,001322	0,006845	3,919074	13,107586	695	3E+06	0,168966	-1	1,7	-33,19067	1,18	-5,16	6287	33,17697	3,5713	11,9	6596	0	27,68944
	-0,00114	-0,007182	3,940957	15,524667	7355	3E+06	0,167501	-1	1,7	-33,27734	1,2	4,88	1012	33,15047	3,60376	11,1	7355	0	27,61087
	-0,0019	0,006687	3,918366	16,089646	1970	3E+06	0,164931	-1	1,8	-33,07277	1,21	4,78	2649	33,12049	3,58887	11,4	1970	0	27,64681
	-0,00017	0,012111	3,895711	14,464996	8898	3E+06	0,168802	-1	1,7	-33,30609	1,22	-5,92	3293	33,18582	3,58272	10,7	8898	0	27,66172
	0,000134	-0,001405	3,91524	13,499232	9426	3E+06	0,160129	-1	1,7	-33,12379	1,2	5,86	8409	33,17155	3,57728	10,2	8990	0	27,67492
	-0,00168	-0,003968	3,947194	13,569781	8298	3E+06	0,174978	-1	1,7	-33,19882	1,22	5,5	7721	33,13216	3,61324	10,3	9168	0	27,58805
	-0,00216	0,002692	3,913006	12,710253	9958	3E+06	0,160845	-1	1,8	-33,0236	1,19	5,17	6591	33,14631	3,56856	10,3	5948	0	27,69611
75	-0,00186	0,015884	3,938069	14,760876	9537	3E+06	0,164843	-1	1,7	-33,28272	1,2	-5,34	2832	33,16664	3,59926	13,5	8990	0	27,62172
Průměr														33,17342	3,57864			0	27,67176
	-0,00093	-0,000304	3,604863	13,722276	285	3E+06	0,111472	-2	2,3	-30,81425	1,48	-7,53	3684	32,2205	3,61928	10,3	852	0	27,57353
	-0,00217	0,000897	3,642277	14,485664	6920	3E+06	0,122695	-2	2,4	-30,82857	1,47	-6,75	7815	32,22785	3,63968	10,5	7523	0	27,52471
	-0,00115	0,00446	3,684776	14,347971	4245	3E+06	0,113598	-2	2,3	-30,84833	1,47	7,15	624	32,18363	3,66429	11,6	2493	0	27,46618
	-0,00344	0,007437	3,657246	15,273994	343	3E+06	0,122107	-2	2,3	-30,92727	1,49	6,13	5887	32,2365	3,65265	11	343	0	27,49382
	-0,00149	0,018433	3,630833	14,506194	4696	3E+06	0,111078	-2	2,4	-30,78454	1,47	-5,77	9232	32,22153	3,62863	11,2	8015	0	27,55112
	-0,00405	0,009183	3,648243	14,248497	9845	3E+06	0,110239	-2	2,4	-30,79851	1,46	-7,42	586	32,21553	3,63265	11	3105	0	27,54151
	-0,00276	0,024713	3,66465	16,043172	695	3E+06	0,107898	-2	2,3	-30,86159	1,47	-6,15	2978	32,23051	3,64433	11,4	695	0	27,51362
	-0,00533	0,02758	3,654145	14,567206	1176	3E+06	0,118961	-2	2,4	-30,87947	1,47	6,07	5074	32,24616	3,64734	11,9	3689	0	27,50645
	-0,0029	0,007527	3,683656	13,753275	2996	3E+06	0,12102	-2	2,3	-30,89541	1,47	-5,68	9112	32,21389	3,65609	12,3	7328	0	27,48564
	-0,00174	0,003488	3,703902	15,936291	9845	3E+06	0,120215	-2	2,3	-30,8778	1,47	6,55	1579	32,20686	3,67176	13,6	3890	0	27,44849
	-0,00215	0,008353	3,633459	14,565132	3482	3E+06	0,117327	-2	2,4	-30,76724	1,49	6,59	3625	32,19531	3,64644	11,6	3482	0	27,50859
100	-0,00344	0,023031	3,68543	14,836515	5362	3E+06	0,110616	-2	2,3	-30,8873	1,45	5,94	8673	32,22275	3,65814	10,7	6568	0	27,48078
Průměr														32,21842	3,64677			0	27,50787
	-0,00277	-0,005385	4,226382	16,539378	7444	3E+06	0,130097	-2	2,5	-29,1808	1,87	-8,16	3679	30,58361	4,36482	12	4294	0	25,94664
	-0,00306	0,007555	4,246547	21,094032	591	3E+06	0,130765	-2	2,5	-29,25763	1,88	-9	3071	30,60647	4,37958	15	591	0	25,91733
	-0,00062	-0,002176	4,207408	17,5281	3471	3E+06	0,131134	-2	2,5	-29,13047	1,87	-8,59	2062	30,5695	4,36881	12,8	320	0	25,93872
	-0,00419	0,00434	4,192486	16,813089	786	3E+06	0,128817	-2	2,5	-29,13337	1,89	-8,05	2064	30,59049	4,35741	13,6	5281	0	25,96142
	-0,00246	0,005224	4,18282	16,75321	3898	3E+06	0,139592	-2	2,5	-29,16044	1,9	-8,35	7920	30,5817	4,36776	13,2	411	0	25,9408
	0,000872	0,006173	4,130913	16,68298	521	3E+06	0,136358	-2	2,5	-29,18726	1,87	-8,21	3753	30,66831	4,30562	14,2	5619	0	26,06527
	-0,0021	0,000309	4,20796	16,460384	3342	3E+06	0,146484	-2	2,5	-29,12633	1,89	-9,04	2868	30,55384	4,37181	12,9	3542	0	25,93276

## 8QAM

125	-0,00271	-0,009068	4,177593	15,868418	3314	3E+06	0,118511	-2	2,5	-29,2192	1,9	-8,11	6769	30,60065	4,37458	13,3	8016	0	25,92725
	0,000081	-0,004412	4,200283	16,212961	6799	3E+06	0,13619	-2	2,5	-29,26429	1,89	-8,41	9254	30,61193	4,36985	11,8	3412	0	25,93665
	-0,00186	0,010597	4,169537	16,550081	3054	3E+06	0,134035	-2	2,5	-29,1624	1,89	-8,29	4407	30,59767	4,34421	13,4	3542	0	25,98776
	-0,00217	0,007403	4,207129	18,250202	8294	3E+06	0,128661	-2	2,5	-29,16728	1,9	-7,84	2441	30,56704	4,39041	13,2	1443	0	25,89587
	Průměr													30,59375	4,36317			0	25,95004
150	-0,00718	0,003821	5,155459	19,591677	9371	3E+06	0,161758	-3	3,1	-27,71921	2,21	-8,81	6484	29,06409	5,23081	15,9	4870	0	24,3746
	0,00759	-0,014549	5,154366	20,053997	9764	3E+06	0,165877	-3	3	-27,84525	2,16	8,13	5168	29,12462	5,20284	15,9	9961	0	24,42116
	-0,00729	0,021784	5,156541	19,563578	661	3E+06	0,155515	-3	3	-27,80854	2,19	-9,52	8443	29,10666	5,22045	15,2	2878	0	24,39181
	-0,0051	0,006388	5,216117	21,543387	7318	3E+06	0,173002	-3	3	-27,83243	2,18	8,79	5053	29,06848	5,26829	15,3	7318	0	24,31258
	-0,00038	0,015689	5,117661	21,121843	2071	3E+06	0,172944	-3	3	-27,80156	2,19	10,4	5884	29,11123	5,21562	15,7	5884	0	24,39986
	0,000936	0,026069	5,089724	18,967038	4784	3E+06	0,166377	-3	3,1	-27,7569	2,21	-8,2	5685	29,08658	5,20139	15,7	4368	0	24,42358
	-0,00052	0,022275	5,101783	22,28347	8210	3E+06	0,153225	-3	3	-27,78845	2,18	-9,98	4640	29,10517	5,19003	15,8	1406	0	24,44257
	-0,00512	0,031444	5,193491	24,017625	9077	3E+06	0,174679	-3	3	-27,92163	2,19	-10,6	2392	29,1057	5,24671	18,3	9077	0	24,34824
	-0,00987	0,040746	5,176405	19,883898	984	3E+06	0,175505	-3	3	-27,9228	2,16	-8,91	5609	29,14576	5,22798	17,5	7605	0	24,3793
	-0,00715	0,004879	5,14863	20,754386	4440	3E+06	0,168439	-3	3	-27,88514	2,16	-8,76	200	29,14508	5,20341	15,7	7605	0	24,42021
	-0,00289	0,032085	5,190769	21,791967	8431	3E+06	0,171992	-3	3	-27,79864	2,17	-9,96	7498	29,08112	5,23748	16,1	9983	0	24,36353
	0,004643	0,004668	5,192684	20,110248	6191	3E+06	0,183911	-3	3	-27,88512	2,17	-10,6	7102	29,10237	5,2401	16,1	3667	0	24,35918
	-0,00203	0,019671	5,173106	20,931338	1775	3E+06	0,171114	-3	3	-27,8588	2,19	-9,69	9687	29,09482	5,24975	16,2	7475	0	24,34321
	Průměr													29,10321	5,22576			0	24,38306
	-0,00177	-0,012102	5,757222	23,025036	929	3E+06	0,172769	-4	3,8	-25,32938	2,8	-13,4	2841	27,15917	6,18942	18,1	3332	0	22,91298
175	-0,00758	0,013815	5,754738	24,603747	5075	3E+06	0,159783	-4	3,8	-25,2531	2,84	-12,2	8020	27,11831	6,21786	18,8	278	0	22,87316
	0,00007	-0,017205	5,77768	22,749266	1475	3E+06	0,140325	-4	3,9	-25,1573	2,78	-12,6	576	27,08591	6,18759	19,8	3477	0	22,91555
	-0,00721	0,042921	5,759819	22,668816	3740	3E+06	0,155629	-4	3,9	-25,222	2,81	14,3	2235	27,11137	6,19695	18,5	2235	0	22,90242
	-0,00147	0,025229	5,662975	25,345292	8079	3E+06	0,149821	-4	3,8	-25,16186	2,77	-12	6375	27,13025	6,10225	19,3	8079	0	23,03618
	-0,00452	0,005023	5,79185	24,563494	238	3E+06	0,162455	-4	3,8	-25,32575	2,79	-11,5	4589	27,15445	6,20601	18,4	5980	0	22,88973
	-0,00498	0,019196	5,772891	24,740659	1077	3E+06	0,148126	-4	3,9	-25,18365	2,79	-11,8	6684	27,10044	6,19605	20,4	7450	0	22,90367
	-0,00189	0,010322	5,78457	25,906878	5356	3E+06	0,144789	-4	3,8	-25,35583	2,81	-11,3	6371	27,1337	6,23673	18,6	5356	0	22,84683
	-0,00726	0,023634	5,810487	25,827064	3185	3E+06	0,157246	-4	3,9	-25,23863	2,82	-12,9	7073	27,09241	6,24095	18,6	3502	0	22,84097
	0,002656	0,035279	5,684237	24,423539	5757	3E+06	0,159002	-4	3,8	-25,32188	2,8	11,6	207	27,20301	6,13772	17,5	704	0	22,98584
	-0,00595	0,030484	5,691839	21,610325	3492	3E+06	0,149539	-4	3,9	-25,21259	2,82	12,2	1342	27,13449	6,17325	17,3	203	0	22,93569
	Průměr													27,12941	6,18952			0	22,913
	-0,00268	0,026085	6,571824	27,068427	4784	3E+06	0,161202	-5	4,5	-23,86376	3,43	-19,6	3634	25,69924	7,27303	25,3	3634	0	21,51167
	-0,00169	-0,003998	6,636126	31,017243	2088	3E+06	0,167335	-5	4,5	-23,9378	3,37	-14	4237	25,72426	7,29298	22,3	2088	0	21,48788
	-0,00051	-0,002291	6,583625	30,316685	422	3E+06	0,143128	-5	4,6	-23,78355	3,41	-14,2	9263	25,65781	7,27688	21,8	422	0	21,50708
	-0,00697	-0,003004	6,641037	28,553965	3451	3E+06	0,150851	-5	4,6	-23,81434	3,39	14,9	2021	25,67405	7,27457	22,5	3699	0	21,50983
	-0,00166	-0,005426	6,727896	26,833433	4599	3E+06	0,153741	-4	4,6	-23,89265	3,38	-13,7	7033	25,66274	7,34555	22,7	9739	0	21,42549
	-0,00073	-0,001508	6,706217	27,608442	5114	3E+06	0,148297	-5	4,6	-23,85752	3,41	-14,5	7033	25,66331	7,35891	21,4	3367	0	21,4097
	-0,00224	0,001443	6,59476	25,692124	5344	3E+06	0,130084	-5	4,6	-23,83674	3,41	-14	5136	25,66616	7,2951	21,6	3502	0	21,48535

## 8QAM

200	-0,00623	-0,010454	6,591748	26,959655	4625	3E+06	0,149333	-5	4,6	-23,85984	3,41	15,8	5062	25,67824	7,29472	25,3	6006	0	21,48581
	-0,00233	0,004945	6,615412	26,812876	865	3E+06	0,150084	-5	4,5	-23,87984	3,39	15,3	9232	25,68615	7,28848	23,9	7473	0	21,49323
	-0,00552	0,015954	6,725021	29,291131	6918	3E+06	0,167949	-4	4,6	-23,88909	3,42	-14,1	6161	25,67758	7,35847	22,3	2083	0	21,41022
Průměr														25,67895	7,30587			0	21,47262
225	0,004171	-0,021267	8,220035	38,596209	6656	3E+06	0,153753	-7	5,6	-21,17327	4,4	27,6	1106	23,29604	9,23343	46,7	1106	0,000033	19,43901
	-0,00452	0,003273	8,268915	32,650062	5352	3E+06	0,100959	-7	5,7	-21,08842	4,51	34,9	4249	23,1916	9,3722	47,7	4249	0,000033	19,30886
	-0,01002	-0,004539	8,343633	38,043863	0	3E+06	0,141976	-7	5,8	-21,04887	4,52	36,6	1416	23,17185	9,40463	53	1416	0,000134	19,27885
	-0,01238	-0,010422	8,329636	38,656678	2358	3E+06	0,140033	-7	5,7	-21,05235	4,47	-19,1	1282	23,18456	9,38186	29,5	5199	0	19,3002
	-0,00285	-0,005883	8,277523	33,09159	7305	3E+06	0,162768	-7	5,6	-21,13827	4,5	39,9	5624	23,23436	9,34294	54,4	5624	0,0001	19,33601
	-0,00936	0,023442	8,290504	34,268894	4291	3E+06	0,167683	-7	5,6	-21,15713	4,54	38,2	14	23,21181	9,40001	61	6969	0,000067	19,28312
	-0,00834	-0,022783	8,287167	37,776063	6237	3E+06	0,13013	-7	5,7	-21,04553	4,48	38	6905	23,18392	9,34141	50,8	6905	0,000067	19,33744
	-0,00745	-0,018969	8,196424	-35,687549	5142	3E+06	0,123971	-7	5,8	-20,93358	4,53	36,1	2292	23,1226	9,34905	52,2	2292	0,0001	19,33004
	-0,00467	0,01411	8,253426	36,564168	5733	3E+06	0,12454	-7	5,6	-21,10415	4,49	31,5	643	23,232	9,33825	54	643	0,000067	19,34066
	0,000923	-0,000686	8,229803	38,490514	5000	3E+06	0,14984	-7	5,7	-21,03597	4,42	39	221	23,20271	9,29126	52,6	1431	0,000067	19,38448
														23,20314	9,3455			0,0000668	19,33387
250	-0,01225	0,048031	10,115592	41,650095	898	3E+06	0,164191	-9	6,9	-19,13065	5,76	39,9	1925	21,21934	11,6915	55,8	2417	0,000769	17,38888
	-0,01085	-0,025754	10,161659	46,43656	1455	3E+06	0,119505	-9	6,9	-19,16117	5,81	42,1	3702	21,21926	11,7269	62,8	3702	0,000969	17,35884
	-0,00733	0,091558	10,299199	-50,34008	9050	3E+06	0,122833	-9	7	-19,14843	5,98	41,3	3645	21,11689	11,9932	63,1	8	0,001739	17,16526
	-0,00474	0,012258	10,224755	61,202678	6955	3E+06	0,202034	-8	7	-19,19363	5,85	41,7	2230	21,19638	11,8406	60,6	1795	0,001304	17,27792
	-0,00607	-0,005794	10,3478	46,090462	2702	3E+06	0,129927	-9	7,1	-19,03328	5,89	-41,6	5275	21,0747	11,9178	61,6	4873	0,001304	17,21796
	-0,01172	-0,02492	10,086439	44,487593	5742	3E+06	0,153145	-8	7	-19,19497	5,78	-46,4	6014	21,24297	11,6849	68,2	6014	0,001003	17,38939
	-0,00636	-0,025481	10,134668	49,689821	4485	3E+06	0,109132	-8	6,8	-19,35457	5,91	40,8	7083	21,2787	11,8381	60,1	1677	0,001538	17,28032
	-0,00259	0,047316	10,262224	44,323886	8643	3E+06	0,113375	-9	6,9	-19,15588	5,99	43,7	1086	21,12761	11,9721	58	9208	0,001471	17,17911
	-0,00133	0,011466	10,18971	48,327504	103	3E+06	0,152051	-9	7,2	-18,96196	5,79	40,9	1378	21,1116	11,7545	59,5	1378	0,001103	17,339
	-0,00288	0,039426	10,219862	39,484914	9535	3E+06	0,130235	-9	7,1	-18,9812	5,87	-39,4	5068	21,08898	11,8395	61,9	6702	0,000903	17,27672
	0,000156	0,045198	10,210492	-43,435435	3833	3E+06	0,148291	-9	7	-19,15312	5,83	43,8	9260	21,18674	11,8158	62,6	5296	0,001237	17,2938
	-0,00186	0,014542	10,16894	44,947809	9845	3E+06	0,154606	-9	7	-19,10403	6,04	42,7	7336	21,08955	11,9788	66,7	8298	0,001907	17,17483
Průměr														21,16273	11,8378			0,0012706	17,2785

Vzdálenos t (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)	
0 Průměr	-0,00085	0,007494	5,10799	22,88608	2675	4000000	0,426714	-0,97683	1,347447	-35,5755	1,563139	-8,00383	4961	31,73367	3,309689	10,74046	8535	0	27,05223
	-0,00204	0,008188	5,102136	22,16472	771	4000000	0,427028	-0,96919	1,320186	-35,7151	1,558868	-8,32498	2449	31,7679	3,306479	10,55905	4764	0	27,06066
	-0,00243	0,009513	5,055055	24,05413	3090	4000000	0,410662	-0,9927	1,318338	-35,6488	1,542017	-8,73486	8160	31,76956	3,292752	10,75304	6904	0	27,09679
	-0,00162	-0,00915	5,05098	22,42467	9956	4000000	0,421439	-0,95575	1,323418	-35,7432	1,517885	-9,35313	7287	31,83152	3,271304	10,90047	1247	0	27,15355
	-0,00157	0,001657	5,08751	23,29131	3551	4000000	0,413424	-0,96847	1,322586	-35,7071	1,568091	-8,49415	3345	31,7913	3,294066	10,25281	6964	0	27,09332
	-0,00147	0,00172	5,145564	23,47293	529	4000000	0,419345	-0,98217	1,351567	-35,5418	1,604001	-7,97725	4107	31,68215	3,328017	11,27514	4822	0	27,00426
	-0,00063	0,013308	5,090665	23,39499	9361	4000000	0,41094	-0,9598	1,330291	-35,701	1,615487	-8,26646	2315	31,72061	3,322851	9,867369	284	0	27,01775
	-0,00249	0,009248	5,163911	22,16358	9537	4000000	0,414128	-0,99166	1,332423	-35,5929	1,619345	-9,68261	8846	31,6743	3,337345	10,52082	2483	0	26,97995
	-0,00072	0,013946	4,982413	20,67892	1726	4000000	0,403545	-0,98374	1,323751	-35,6542	1,591357	-9,84112	1149	31,80299	3,280479	9,950351	3071	0	27,12923
	-7,6E-05	-0,00169	5,006961	22,42665	5469	4000000	0,406813	-0,96385	1,308911	-35,7803	1,602264	-8,24572	5305	31,83093	3,280564	11,04332	2821	0	27,129
	-0,00326	0,015794	4,997584	23,47832	6248	4000000	0,412777	-0,98936	1,330875	-35,6066	1,558584	-8,48861	7860	31,78958	3,277062	10,28731	4073	0	27,13828
	-0,00238	0,012707	5,021058	22,03381	848	4000000	0,421477	-0,94956	1,341276	-35,6853	1,606185	-8,6209	4215	31,75066	3,307354	11,15689	97	0	27,05836
	-0,00119	0,008867	5,104586	23,63637	5337	4000000	0,418253	-0,97583	1,324625	-35,6753	1,628583	-9,11313	5664	31,6965	3,328859	11,28981	8157	0	27,00206
	-0,00078	0,003816	5,015917	22,56181	9893	4000000	0,417427	-0,99287	1,339362	-35,5601	1,600846	-8,7412	1622	31,73515	3,299654	10,32354	1968	0	27,0786
	-0,00101	0,001996	5,056639	21,18704	9694	4000000	0,411737	-0,95565	1,3381	-35,6803	1,633846	-7,91986	4969	31,74596	3,309113	11,15546	7969	0	27,05374
	-0,00195	0,011477	4,987162	23,07545	629	4000000	0,42017	-0,98568	1,309344	-35,709	1,553697	-9,73799	4395	31,83296	3,268976	10,43421	8011	0	27,15974
	Průměr													31,75973	3,30091			0	27,07547
	25 Průměr	-0,00165	0,011404	5,451703	26,6043	5469	4000000	0,414444	-0,99337	1,470656	-35,0174	1,542756	8,501425	7670	31,75105	3,227147	9,926122	1248	0
-0,00286		0,013887	5,666027	25,25253	997	4000000	0,430794	-1,01263	1,471583	-34,9608	1,510059	8,769086	613	31,64471	3,272207	9,520508	8121	0	27,15116
0,001057		0,018562	5,542112	25,00118	9065	4000000	0,426102	-0,99266	1,482784	-34,9703	1,529351	8,961431	2827	31,69269	3,252451	9,458363	4701	0	27,20375
0,000035		0,00081	5,650571	27,22299	5850	4000000	0,441847	-1,01244	1,46361	-34,9932	1,546115	8,730763	2453	31,62439	3,287155	10,03221	3071	0	27,11157
-0,00246		0,015132	5,847828	26,32199	5174	4000000	0,441321	-0,99954	1,449546	-35,086	1,545484	8,718888	838	31,5784	3,319275	9,569207	8968	0	27,02711
0,001057		0,005999	5,774229	24,24766	3122	4000000	0,440791	-1,0009	1,439602	-35,1226	1,527726	8,366931	9263	31,61682	3,31161	10,02799	2473	0	27,04719
-0,00279		0,003018	5,730234	27,5848	4699	4000000	0,439654	-1,001	1,462619	-35,029	1,532311	8,002855	885	31,60234	3,304007	10,19075	8139	0	27,06715
0,001125		0,016449	5,84627	25,25984	771	4000000	0,444254	-0,99364	1,461518	-35,0538	1,539296	9,048388	545	31,56507	3,330063	9,787155	1247	0	26,99892
-0,0003		-0,01175	5,741113	25,03115	3200	4000000	0,437204	-0,99231	1,465268	-35,0422	1,523495	8,108906	6639	31,58946	3,308869	10,82895	2745	0	27,05438
-0,00051		-0,0009	5,790169	25,45139	5633	4000000	0,446719	-0,98554	1,437881	-35,173	1,533003	7,871526	9059	31,58363	3,330822	10,22323	66	0	26,99694
Průměr														31,62486	3,294361			0	27,09298
-0,00102		0,017884	5,070351	24,5502	3126	4000000	0,394187	-1,2131	1,486021	-34,3417	1,560495	-8,39266	881	31,57607	3,215969	10,4895	4875	0	27,30173
-0,00165		0,013529	4,992561	22,82938	2462	4000000	0,383298	-1,18521	1,50929	-34,3384	1,54668	-10,7569	3749	31,60288	3,201127	10,70198	1448	0	27,34191
-0,00299		0,016339	5,050291	22,12638	6378	4000000	0,379099	-1,19901	1,504818	-34,3155	1,563759	-9,35798	4366	31,55034	3,227603	9,789533	9416	0	27,27037
-0,00311		0,019052	4,988647	23,69934	9061	4000000	0,384778	-1,22942	1,53002	-34,1426	1,570457	-8,9375	697	31,49514	3,220834	11,01935	4822	0	27,2886
0,000602		0,01988	4,997549	21,11215	8305	4000000	0,38591	-1,2054	1,507648	-34,2876	1,561324	-9,97727	1130	31,5553	3,219844	9,924264	285	0	27,29127
-0,00229		0,010682	5,029334	22,92366	1160	4000000	0,382646	-1,22835	1,50516	-34,2316	1,589331	-9,63962	3534	31,50222	3,233993	9,494324	1247	0	27,25319
-0,00099		-0,00079	5,077144	25,30215	9136	4000000	0,382572	-1,21303	1,503294	-34,2814	1,559544	-8,67362	4074	31,49254	3,253348	11,96044	4875	0	27,20136
-0,00322	0,01039	4,994497	22,4025	6036	4000000	0,385339	-1,19955	1,472132	-34,4296	1,580605	-9,01935	1741	31,57955	3,228921	10,16205	4822	0	27,26682	
-0,00195	0,01084	4,959253	23,5363	9721	4000000	0,364953	-1,18606	1,480068	-34,4402	1,584116	-8,78684	9312	31,59611	3,217447	9,729997	1687	0	27,29774	

## 16QAM

50 Průměr	-0,00175	0,000969	4,992533	24,55148	7964	4000000	0,378403	-1,19387	1,492318	-34,3743	1,558218	9,485989	1952	31,5894	3,212815	10,48416	9415	0	27,31026
	-0,00322	0,000504	4,981238	22,12824	2584	4000000	0,390594	-1,20095	1,506604	-34,3038	1,580648	-9,32341	5271	31,51809	3,239828	11,09439	6992	0	27,23753
														31,5507	3,224703			0	27,27825
	-0,00218	0,023659	5,914735	28,93624	2772	4000000	0,47944	-1,32418	1,701238	-33,3277	1,6829	-9,07708	5567	30,54847	3,602572	10,48004	4822	0	26,31572
	-0,00204	0,005092	5,891539	28,14487	6377	4000000	0,469695	-1,32926	1,719147	-33,2584	1,659748	-9,84134	9293	30,53665	3,601497	11,3912	2473	0	26,31831
	0,000383	0,002927	5,910485	28,77738	8713	4000000	0,475486	-1,31214	1,672163	-33,4507	1,639759	-10,1762	8361	30,57367	3,610194	11,51343	4015	0	26,29736
	-0,00143	0,014295	5,919963	27,59929	4903	4000000	0,470253	-1,32217	1,695454	-33,351	1,683382	-8,4193	825	30,58065	3,606571	12,06827	4822	0	26,30608
	-0,00093	0,001476	6,03184	28,15218	3370	4000000	0,481791	-1,28736	1,699724	-33,4234	1,669318	-10,6879	3793	30,48984	3,660026	11,97563	6276	0	26,17829
	-0,00045	0,016479	6,013628	30,36573	1786	4000000	0,481139	-1,30697	1,69374	-33,3943	1,671894	-9,50137	8846	30,52001	3,639847	13,22055	2821	0	26,22631
	-0,00034	0,002773	6,00809	25,52407	5634	4000000	0,482266	-1,31377	1,698312	-33,3628	1,654284	-9,6329	7569	30,51025	3,64149	10,67036	8263	0	26,22239
	-0,00385	0,00525	6,029256	27,37048	3425	4000000	0,495899	-1,29476	1,690543	-33,4349	1,676331	10,24586	7651	30,50758	3,652109	11,37686	2821	0	26,1971
	-0,00186	0,017505	5,987651	29,44573	1081	4000000	0,471334	-1,31815	1,713003	-33,3051	1,663645	8,250668	2703	30,4745	3,645835	11,63126	6365	0	26,21203
	-0,00116	0,018101	5,86377	28,02536	7766	4000000	0,475055	-1,30209	1,700629	-33,3842	1,667732	-9,49627	2544	30,61233	3,586871	11,5492	2821	0	26,35366
	-0,00307	0,004436	5,95218	24,51926	4951	4000000	0,472288	-1,29053	1,663132	-33,5345	1,644154	-9,20868	9828	30,60688	3,61125	10,18246	1950	0	26,29482
	-0,00135	0,008007	6,021916	26,14558	3550	4000000	0,475537	-1,29718	1,709595	-33,3673	1,641984	-9,464	9751	30,50874	3,639732	10,90514	1247	0	26,22658
														30,53913	3,624833			0	26,26239
	-0,00294	0,002078	5,11323	25,10629	6884	4000000	0,30595	-1,65656	2,321843	-30,8963	2,13494	11,58826	4848	29,69786	3,607798	11,35312	1805	0	26,30313
	0,000802	0,020218	5,166958	25,54357	775	4000000	0,294791	-1,6547	2,355202	-30,8171	2,150612	-12,1942	9346	29,66583	3,609601	10,94686	3782	0	26,29879
	-0,00686	0,02841	5,281029	30,55876	5174	4000000	0,319649	-1,61028	2,296698	-31,0414	2,137385	-11,0629	3618	29,69323	3,649229	10,89595	1616	0	26,20395
	-0,00434	-0,02125	5,256558	29,82292	5086	4000000	0,315589	-1,62563	2,315857	-30,9659	2,131883	13,02212	3302	29,65265	3,652027	12,44356	4130	0	26,19729
	0,001556	0,047699	5,225068	28,40503	8004	4000000	0,309797	-1,64257	2,313856	-30,941	2,144005	13,82583	2781	29,62917	3,662072	11,74716	3003	0	26,17343
	0,003365	0,028659	5,143336	27,27751	8878	4000000	0,292892	-1,65462	2,304514	-30,9428	2,12808	12,64323	5214	29,71129	3,611866	12,21094	2789	0	26,29334
	-0,00444	0,008411	5,170276	25,43067	8885	4000000	0,294227	-1,61636	2,298552	-31,026	2,141439	-13,8441	9655	29,71898	3,636749	12,89657	6276	0	26,2337
	-0,00744	0,028003	5,197898	26,08564	5851	4000000	0,299761	-1,63293	2,321298	-30,9394	2,117483	14,82873	361	29,67835	3,630527	12,43464	4272	0	26,24858
	0,001317	-0,02412	5,193141	27,74448	5696	4000000	0,305487	-1,59411	2,306483	-31,0452	2,15466	13,26943	3799	29,70503	3,63896	13,91388	2473	0	26,22843
	0,002629	0,022977	5,210872	27,74827	7160	4000000	0,301478	-1,59693	2,308253	-31,0357	2,145677	13,09396	1138	29,7034	3,64007	11,54087	8675	0	26,22578
	0,000491	0,006208	5,106398	30,63805	5588	4000000	0,302071	-1,62296	2,317751	-30,9659	2,177008	-13,2446	3928	29,69178	3,62231	11,52173	1782	0	26,26826
														29,68614	3,632837			0	26,24315
	-0,00439	0,005382	6,36927	32,9765	7493	4000000	0,398656	-2,43105	2,428911	-29,2776	2,703599	-14,3023	9734	27,99873	4,401499	12,80525	6197	0	24,57596
	-0,00371	-0,01129	6,275369	36,05919	8438	4000000	0,382839	-2,37184	2,431018	-29,3797	2,699442	-15,1761	5779	28,0213	4,409985	12,9559	1462	0	24,55923
	-0,00379	0,025086	6,259944	31,51785	5114	4000000	0,386871	-2,40809	2,456758	-29,2685	2,735658	-17,2976	2377	27,95436	4,440274	14,30849	1759	0	24,49978
	-0,00488	0,004906	6,173185	32,47778	9536	4000000	0,375162	-2,42163	2,440176	-29,2743	2,757901	-14,0865	8091	27,98012	4,410567	12,91967	7683	0	24,55808
	-0,00398	0,032022	6,22995	31,59935	8808	4000000	0,368609	-2,40599	2,45807	-29,2698	2,721126	-16,9123	5152	28,01542	4,382594	13,8995	1427	0	24,61335
	-0,00017	0,004189	6,114307	31,84956	6087	4000000	0,35902	-2,41367	2,431994	-29,3032	2,730877	-15,7327	676	28,02489	4,383015	14,83099	4272	0	24,61251
	-0,00713	0,020241	6,169733	34,91181	8437	4000000	0,367013	-2,37294	2,449791	-29,3433	2,780652	-16,1645	2929	27,99751	4,42969	12,56993	152	0	24,5205
	-0,00263	0,01067	6,230526	38,06503	997	4000000	0,34881	-2,387	2,426137	-29,3614	2,751757	-15,7721	1741	28,05681	4,397151	13,94194	2468	0	24,58454
	-0,00399	-0,00105	6,182727	32,81952	3196	4000000	0,358698	-2,40784	2,451897	-29,2777	2,76297	-16,7685	1528	27,99599	4,415392	12,85717	2241	0	24,54859
	-0,00218	-0,01287	6,10942	38,77647	9721	4000000	0,363586	-2,40487	2,444246	-29,2968	2,797486	-17,2405	1063	27,98491	4,421483	13,07664	9721	0	24,53661
														28,003	4,409165			0	24,56091

	-0,00501	0,02465	8,023005	49,93707	7093	4000000	0,510381	-2,72054	2,943667	-27,9408	3,03031	-20,0581	4417	26,53313	5,238374	16,68905	7093	0	23,06404
	-0,01156	-0,00504	7,980129	45,61728	997	4000000	0,516165	-2,67203	2,964211	-27,9789	3,096851	-18,1332	6800	26,53539	5,260942	16,62138	997	0	23,0267
	-0,00304	0,000682	7,731113	41,8715	9807	4000000	0,449026	-2,68935	2,985572	-27,9193	3,117184	-16,2613	194	26,62202	5,139008	15,99446	2789	0	23,23038
	-0,00248	0,027367	7,545098	40,08545	6394	4000000	0,467771	-2,7111	2,991052	-27,8791	3,127797	-18,3882	389	26,59323	5,141397	16,59771	4035	0	23,22635
	0,002482	0,01244	7,749416	42,37751	5851	4000000	0,48132	-2,67707	2,94098	-28,009	3,117351	-17,4876	3637	26,61947	5,177626	15,94934	1426	0	23,16536
	0,002412	0,05307	7,549367	40,11537	2907	4000000	0,434831	-2,72146	3,013842	-27,8279	3,065931	-16,9836	993	26,6016	5,117473	14,74066	8665	0	23,26686
	-0,00155	-0,00117	7,786182	42,90536	1743	4000000	0,473948	-2,69603	2,973037	-27,9297	3,085715	-17,1268	2160	26,56763	5,204699	16,94784	5604	0	23,12006
	-0,00324	0,002211	7,780703	50,79179	7584	4000000	0,483126	-2,62138	2,9098	-28,1421	3,125325	-17,3553	4948	26,65508	5,196316	17,50292	7584	0	23,13406
	-0,00704	0,045959	7,687147	41,13898	1726	4000000	0,462804	-2,67678	2,955338	-27,9863	3,087724	-16,5574	8789	26,65339	5,13128	15,54322	1247	0	23,24346
	-0,00323	-0,02919	7,622327	41,04201	7835	4000000	0,447695	-2,77057	2,941397	-27,8707	3,121397	17,01259	4170	26,59704	5,130553	16,49656	3674	0	23,24469
0,004692	0,046495	7,423243	42,31645	9150	4000000	0,418349	-2,75836	3,024107	-27,7589	3,183419	-18,5858	932	26,56297	5,143867	16,36278	94	0	23,22218	
-0,01146	0,004805	7,420393	40,417	9773	4000000	0,427141	-2,71671	3,008521	-27,8432	3,110372	16,3568	1411	26,64764	5,099921	15,93871	5699	0	23,2967	
150	-0,00628	0,039218	7,685972	48,6396	3399	4000000	0,442844	-2,7356	2,987613	-27,8491	3,077135	-16,8783	4496	26,60719	5,129401	16,42873	9416	0	23,24664
Průměr														26,59967	5,162374			0	23,19134
	-0,00494	-0,03082	8,596621	51,08974	2316	4000000	0,456057	-3,82966	3,787294	-25,3745	4,000973	22,1909	6315	24,7021	6,063513	32,61378	4181	0,00005	21,79418
	-0,00738	0,046178	8,524462	42,39823	9694	4000000	0,418115	-3,86495	3,671365	-25,4643	4,012255	-23,5011	6851	24,72389	6,074274	32,8797	8729	0,00005	21,77739
	-0,00105	0,062751	8,553926	51,58426	3630	4000000	0,417133	-3,8137	3,712341	-25,4782	3,987158	27,81026	80	24,73371	6,074245	37,24121	5465	0,000075	21,77882
	-0,00303	-0,01327	8,624134	47,58121	629	4000000	0,45687	-3,70931	3,753873	-25,5517	3,972626	-24,5219	9913	24,73932	6,093736	37,40588	3568	0,000125	21,74856
	-0,00404	0,001154	8,603889	59,62814	9390	4000000	0,405237	-3,75611	3,750486	-25,5014	3,909254	22,39721	3630	24,7378	6,061332	19,87629	9390	1,00E-06	21,79661
	0,002491	0,059079	8,730056	49,86602	3525	4000000	0,438753	-3,77806	3,703739	-25,5298	3,968879	-23,6862	9033	24,70768	6,132486	18,43433	9374	1,00E-06	21,69524
	-0,006	-0,01706	8,678095	50,18074	996	4000000	0,44386	-3,77311	3,743004	-25,4904	3,920441	-22,5721	1193	24,7057	6,116083	19,17815	8157	1,00E-06	21,7185
	-0,0084	-0,01323	8,561605	43,5333	3200	4000000	0,420796	-3,75285	3,776036	-25,4756	3,971933	22,4437	8703	24,73359	6,059372	18,89053	3647	1,00E-06	21,79942
	-0,004	0,023713	8,664272	49,77677	2422	4000000	0,447807	-3,79789	3,824054	-25,3689	3,934202	-23,2472	6044	24,66037	6,099204	30,85283	1163	0,000025	21,74216
	-0,00595	-0,00059	8,464576	43,0622	142	4000000	0,421522	-3,77493	3,730452	-25,5027	3,988902	-22,2314	8915	24,7758	6,021352	16,43419	6849	1,00E-06	21,85409
0,000511	0,014436	8,540485	47,77478	4684	4000000	0,39877	-3,73935	3,650242	-25,6373	3,94885	-29,1897	3393	24,79201	6,07374	36,67479	3393	0,000025	21,77885	
-0,00045	0,006991	8,536254	51,51128	5621	4000000	0,413586	-3,77657	3,73213	-25,4989	4,004552	24,94566	1319	24,74493	6,089575	19,12765	253	1,00E-06	21,75623	
-0,00995	0,011889	8,676736	53,12763	8713	4000000	0,463343	-3,80099	3,739592	-25,4619	4,006068	-21,6951	6978	24,68279	6,132216	18,73938	25	1,00E-06	21,69562	
-0,00122	-0,00905	8,371848	50,73915	3200	4000000	0,403418	-3,79961	3,664341	-25,5495	3,993656	-22,9838	9432	24,78059	6,054977	17,98487	8568	1,00E-06	21,80572	
175	-0,00853	-0,01388	8,610291	49,41887	1366	4000000	0,460169	-3,75874	3,740197	-25,5103	3,882594	-23,6223	687	24,74995	6,062784	31,98397	4130	0,000025	21,79418
Průměr														24,73135	6,080593			2,55E-05	21,76904
	-0,00657	0,006462	9,828037	56,05524	3958	4000000	0,424284	-4,36229	4,442682	-24,1154	5,022048	-34,6123	7182	23,21767	7,307978	45,83506	7182	0,000326	20,17133
	-0,0042	0,016839	9,975497	56,07533	9168	4000000	0,424289	-4,4204	4,332362	-24,167	5,032634	32,19181	9384	23,16712	7,415467	41,5831	9380	0,000652	20,04277
	-0,00158	0,01213	9,867369	56,2165	6915	4000000	0,442865	-4,30345	4,428987	-24,1867	4,896407	28,09737	1868	23,25931	7,272383	38,9668	6704	0,000301	20,21096
	0,002525	-0,01481	9,913521	56,73572	2725	4000000	0,375585	-4,41662	4,441434	-24,0635	4,872597	-35,0792	4897	23,21625	7,245702	47,78188	4897	0,000301	20,24393
	-0,00675	0,052514	9,748582	57,42955	7930	4000000	0,395646	-4,37634	4,40844	-24,1356	4,939658	-33,3208	2179	23,23748	7,267533	45,7345	2179	0,000451	20,2178
	-0,00241	0,033006	9,874335	63,50714	9662	4000000	0,427571	-4,51738	4,467179	-23,9402	4,971502	-30,0929	7524	23,16136	7,255366	40,11041	5465	0,000301	20,23444
	-0,0082	0,043424	9,861224	53,61965	5141	4000000	0,430122	-4,39152	4,429152	-24,1002	4,925925	-29,5708	1315	23,22778	7,271145	47,12023	1303	0,000276	20,21418
	-0,00376	0,010773	9,779942	58,5415	576	4000000	0,399549	-4,41707	4,45113	-24,0535	4,895354	-36,6217	8267	23,24766	7,226466	38,1426	1687	0,000301	20,26632
	-0,01121	0,014672	9,701162	66,07763	7576	4000000	0,400769	-4,4403	4,413743	-24,0674	4,939655	-29,2593	2305	23,20933	7,268171	40,27979	2573	0,000401	20,21773
	-0,00314	-0,00297	9,634723	52,47811	6376	4000000	0,40096	-4,38572	4,437379	-24,0977	4,968564	-30,4	9855	23,2421	7,259599	39,30734	5690	0,000426	20,22659

16QAM

	-0,00162	0,013127	9,792569	51,52786	4320	4000000	0,428716	-4,4006	4,489501	-24,0317	4,954009	-36,0077	8813	23,17518	7,301882	43,59596	2181	0,000276	20,17719
	-0,00655	0,030911	9,77026	54,96652	1527	4000000	0,419195	-4,42176	4,53151	-23,97	4,993836	-57,478	3473	23,16688	7,286308	37,72666	3394	0,000276	20,19608
200	0,003177	0,014871	9,787526	56,19034	1311	4000000	0,408064	-4,55897	4,490764	-23,8773	4,899564	-31,4896	8576	23,14814	7,225568	41,07306	9984	0,000201	20,27018
Průměr														23,20586	7,277198			0,000345	20,20688

Vzdálenos t (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)	
0	-0,00114	0,025074	5,220435	34,62791	5453	5000000	0,387803	-0,99261	1,348111	-35,5243	1,623061	-11,0894	6272	31,01797	3,335495	10,45594	8787	0	27,26884
	-0,00036	0,009818	5,292954	25,53344	2499	5000000	0,393759	-0,96408	1,351067	-35,599	1,671524	-11,5409	5371	30,96142	3,37177	10,11599	38	0	27,17488
	-0,00039	0,016094	5,222896	26,90805	8440	5000000	0,395277	-0,98002	1,333858	-35,6231	1,57641	-13,5122	3514	31,07471	3,324017	9,840028	1729	0	27,29878
	0,001153	0,005391	5,244369	23,78719	4398	5000000	0,397958	-0,9797	1,340489	-35,5961	1,59694	-12,1941	14	31,07954	3,317921	9,492104	1536	0	27,31472
	-0,00142	0,029817	5,211903	26,80449	1550	5000000	0,389326	-0,96784	1,341003	-35,6304	1,650131	-11,5616	9351	31,02075	3,35121	10,40803	7227	0	27,22801
	0,000086	0,015441	5,276345	27,49161	8268	5000000	0,387313	-0,97768	1,362986	-35,5074	1,681465	-11,4353	1727	30,94564	3,379563	9,960681	8269	0	27,15483
	-0,00086	0,004058	5,255532	27,60089	4685	5000000	0,388147	-0,95099	1,3872	-35,4841	1,727983	-10,9182	2264	30,87919	3,399946	10,65463	1844	0	27,1026
	-0,00109	0,0297	5,313158	31,04396	4918	5000000	0,389006	-0,96553	1,352003	-35,5907	1,709394	-11,7769	3634	30,91848	3,395489	10,59366	1536	0	27,11399
	-0,00187	0,013432	5,184951	24,61313	6086	5000000	0,384646	-0,97794	1,359807	-35,52	1,643642	-10,9677	3325	31,0007	3,352384	10,18122	8787	0	27,22497
	0,000454	0,009247	5,236911	27,01933	3592	5000000	0,380644	-0,96277	1,330853	-35,6894	1,689713	-12,4678	9038	30,9886	3,377472	10,47722	9722	0	27,16021
Průměr													30,9887	3,360527			0	27,20418	
25	0,002102	-1,3E-05	5,93768	38,44237	6261	5000000	0,406334	-1,04558	1,475742	-34,8531	1,516844	11,26651	1018	30,91555	3,293498	9,332634	6261	0	27,37889
	0,002747	0,012253	6,081841	31,7677	9055	5000000	0,41928	-1,01161	1,48308	-34,9176	1,523304	11,43889	604	30,85902	3,332336	10,05696	2890	0	27,27706
	-0,00144	0,000682	6,174599	30,60757	7901	5000000	0,431479	-1,02111	1,456191	-34,9988	1,518465	10,92733	1943	30,81113	3,365739	9,652055	7146	0	27,19043
	-0,00246	-0,00685	6,092201	30,59853	1902	5000000	0,432372	-1,01666	1,492934	-34,8646	1,520358	10,14917	7936	30,80851	3,34489	9,677405	8787	0	27,2444
	0,000583	-0,01505	6,141525	33,9907	5857	5000000	0,448377	-1,03017	1,477921	-34,8872	1,526346	-10,2752	4091	30,76791	3,380481	9,441564	9459	0	27,15247
	-0,00178	-0,00073	6,119116	34,08077	6261	5000000	0,433455	-1,00713	1,484798	-34,9229	1,499807	10,63777	1572	30,72525	3,399936	10,32813	598	0	27,10263
	0,001326	0,011097	6,076198	36,47549	285	5000000	0,423847	-1,02112	1,462002	-34,9755	1,506189	9,467466	917	30,8001	3,369777	9,400524	9651	0	27,18002
	-0,00313	-0,01566	6,135073	35,45964	4447	5000000	0,436158	-1,00971	1,459404	-35,0178	1,511152	9,649809	4086	30,8274	3,360578	10,49782	7227	0	27,20376
	-0,00075	0,005863	6,146493	36,06645	9364	5000000	0,434189	-1,03441	1,445617	-35,0034	1,510671	12,74298	6150	30,73446	3,406643	9,300815	1605	0	27,08551
	-0,00224	0,000209	6,151227	32,07751	8150	5000000	0,44126	-1,0126	1,480423	-34,9255	1,549582	12,76755	3634	30,68852	3,424091	9,553651	7641	0	27,04114
Průměr	0,005641	-0,0091	6,107925	33,03015	2329	5000000	0,424564	-0,98777	1,468828	-35,0402	1,51658	-10,0135	3768	30,70512	3,43434	10,09365	7998	0	27,01517
													30,78572	3,373846			0	27,17013	
50	-0,00064	0,013628	5,150717	30,53321	5315	5000000	0,360758	-1,20612	1,512781	-34,2675	1,637444	-11,1241	6193	30,82234	3,266942	10,56607	9021	0	27,44921
	-0,00038	0,010542	5,255065	29,9062	5316	5000000	0,36366	-1,22509	1,531148	-34,1507	1,620786	-13,4318	5152	30,78863	3,268593	9,540826	9305	0	27,44482
	0,000067	0,000684	5,246357	32,88787	8319	5000000	0,357836	-1,21582	1,511673	-34,2442	1,637617	-13,39	9242	30,79862	3,272833	9,823418	7146	0	27,43356
	0,000068	0,009759	5,185707	27,38176	4918	5000000	0,358047	-1,18426	1,521845	-34,2963	1,653662	-13,5226	8460	30,7945	3,288549	9,911137	1838	0	27,39195
	0,001614	0,021387	5,208448	26,64949	3549	5000000	0,356096	-1,23133	1,509156	-34,2093	1,602657	-11,256	2423	30,80768	3,266477	10,08117	8636	0	27,45045
	-0,00137	0,004239	5,18959	31,44566	6389	5000000	0,349688	-1,21264	1,502085	-34,2867	1,62332	-13,1952	8660	30,81834	3,268283	10,69705	247	0	27,44565
	-0,00228	0,014066	5,115123	29,55265	2209	5000000	0,366332	-1,21657	1,535579	-34,1589	1,657781	-12,6832	1012	30,76749	3,280065	10,21355	3349	0	27,41439
	0,000325	0,011574	5,158583	27,41664	3743	5000000	0,355486	-1,18908	1,51747	-34,2985	1,677716	-14,9726	2498	30,81379	3,279676	10,07402	7089	0	27,41542
	-0,00188	0,022601	5,087693	25,43568	6936	5000000	0,34925	-1,21439	1,529074	-34,1875	1,6499	-11,3066	5719	30,78911	3,270363	10,59448	8760	0	27,44012
	Průměr	-0,00173	0,005559	5,164923	33,32878	8308	5000000	0,355777	-1,19365	1,501959	-34,3407	1,640586	-11,3226	6175	30,81618	3,278949	9,662926	7409	0
													30,80167	3,274073			0	27,43029	
	0,00066	0,006521	6,113072	33,14424	4969	5000000	0,428833	-1,33173	1,714416	-33,2673	1,754608	11,5809	2332	29,81849	3,663766	10,36146	9392	0	26,45349



## 32QAM

	0,000296	0,011534	6,107913	32,2318	5040	5000000	0,43933	-1,33592	1,719383	-33,2413	1,702702	12,77439	6172	29,81422	3,663421	11,05618	4006	0	26,4543
	0,000332	0,002336	6,201953	32,7366	2013	5000000	0,469453	-1,31642	1,725054	-33,2709	1,736989	13,6198	753	29,75823	3,687448	11,28954	8012	0	26,39752
	-0,00061	0,006656	6,02885	36,90549	2975	5000000	0,42407	-1,33004	1,695514	-33,3313	1,766935	14,18799	214	29,87194	3,628434	11,59874	1447	0	26,53766
	-0,00079	0,000023	6,179549	36,38589	7936	5000000	0,448902	-1,32695	1,736909	-33,2078	1,735441	12,37027	4759	29,75812	3,684634	12,03279	38	0	26,40415
	0,000688	0,014351	6,202537	33,77927	3964	5000000	0,464941	-1,30086	1,717738	-33,3321	1,745478	-16,2953	7495	29,75306	3,708315	11,28329	598	0	26,34851
	0,000431	-0,00064	6,22081	31,60697	5945	5000000	0,457178	-1,30138	1,734393	-33,2775	1,738676	11,12832	7399	29,78045	3,688021	11,14754	38	0	26,39617
	-0,00059	0,020379	6,191922	31,00363	8422	5000000	0,438968	-1,32481	1,709194	-33,3008	1,727486	-10,33	9384	29,75515	3,697629	10,64843	1536	0	26,37358
	-0,00113	0,026598	6,175647	33,43084	853	5000000	0,439866	-1,29738	1,734831	-33,2857	1,730015	-13,6004	2485	29,77728	3,68501	12,06029	7567	0	26,40327
	0,001683	0,011215	6,228135	31,89941	8936	5000000	0,450403	-1,295	1,679052	-33,4715	1,752846	-11,692	1579	29,78674	3,707988	10,68749	9638	0	26,34928
	-0,00054	0,006441	6,244974	30,834	3456	5000000	0,455964	-1,30636	1,749514	-33,2172	1,750912	-13,6113	1693	29,73795	3,710328	11,0241	5500	0	26,3438
	-0,00074	0,012416	6,238145	34,87998	3033	5000000	0,44731	-1,30295	1,702726	-33,3753	1,78909	12,76459	2464	29,7915	3,695417	13,3963	8787	0	26,37877
75	0,000216	0,006189	6,12527	36,35947	8936	5000000	0,433298	-1,28865	1,709486	-33,3885	1,748992	14,56238	1572	29,81259	3,68012	10,70976	1201	0	26,4148
Průměr														29,78582	3,684656			0	26,40425
	0,004389	0,008467	5,32457	31,35171	2572	5000000	0,268222	-1,64265	2,341085	-30,873	2,307361	-15,5051	7678	28,98222	3,651013	11,42855	6964	0	26,48377
	-0,00428	0,011634	5,352057	31,88453	8285	5000000	0,267119	-1,66663	2,30549	-30,9189	2,244472	-14,9505	7877	29,03284	3,628594	12,24972	4006	0	26,53727
	0,002625	0,036423	5,346879	34,9531	8986	5000000	0,286407	-1,62161	2,335684	-30,9232	2,247188	15,58977	9416	29,04487	3,622043	11,333	1402	0	26,55297
	0,001582	0,006151	5,414351	33,90601	1507	5000000	0,277073	-1,63209	2,332695	-30,9124	2,224746	17,94937	5856	29,01565	3,6508	11,08194	8380	0	26,48428
	-0,00503	0,01024	5,287638	39,34916	2512	5000000	0,261086	-1,63426	2,319764	-30,9409	2,283612	-19,2194	6559	29,04954	3,626553	11,48963	8286	0	26,54216
	0,003819	-0,02109	5,342586	31,18648	4224	5000000	0,277803	-1,64217	2,351393	-30,8482	2,210694	16,0769	7525	29,02231	3,619435	12,99828	517	0	26,55923
	0,003518	0,012811	5,313071	34,96669	467	5000000	0,255009	-1,66685	2,359829	-30,7846	2,268615	16,71758	7299	28,96622	3,638895	11,22377	7373	0	26,51265
	-0,00268	0,014063	5,333446	33,73405	3549	5000000	0,288297	-1,6215	2,344862	-30,9004	2,241546	-16,1558	407	28,97936	3,663309	10,97455	788	0	26,45457
	-0,00089	-0,03702	5,202703	32,52377	4014	5000000	0,275978	-1,64568	2,336188	-30,8799	2,27486	-17,1706	8915	29,02844	3,618965	11,73846	2486	0	26,56035
	-0,00524	0,028392	5,342643	46,05972	3199	5000000	0,289277	-1,64466	2,319217	-30,9239	2,274008	-18,0583	2893	29,01583	3,645581	11,36498	3199	0	26,49671
100	0,000284	0,050161	5,288783	32,40493	3593	5000000	0,267735	-1,66125	2,303289	-30,934	2,260456	-16,5295	4270	29,02958	3,63918	12,56284	8787	0	26,51197
Průměr	-0,00339	-0,02089	5,445863	30,75202	8308	5000000	0,310312	-1,58395	2,35185	-30,9474	2,217664	16,73682	9664	28,95174	3,676305	12,87463	3572	0	26,42381
														29,00988	3,640056			0	26,50998
	-0,00246	-0,00503	6,50476	44,37633	4706	5000000	0,360305	-2,3641	2,503008	-29,2613	2,830645	-19,2977	732	27,31926	4,448432	13,97862	5225	1,00E-06	24,7679
	0,000524	0,037802	6,644179	43,74073	3732	5000000	0,350386	-2,39375	2,506596	-29,2035	2,88851	-19,7438	2119	27,2176	4,516067	26,2247	8867	0,0001	24,6358
	-0,00157	-0,00546	6,551459	42,74912	8422	5000000	0,372308	-2,40277	2,481768	-29,2327	2,841582	-19,0666	3849	27,27275	4,465589	22,83054	9488	0,00006	24,73429
	0,001674	0,01646	6,465241	54,15081	9124	5000000	0,349162	-2,37878	2,461542	-29,3115	2,848611	-19,3981	1790	27,32482	4,444542	14,74023	7264	1,00E-06	24,7755
	-0,00518	0,005936	6,419925	45,59794	3969	5000000	0,372118	-2,44423	2,474895	-29,1724	2,842008	-22,4968	6303	27,3047	4,414817	24,37267	8929	0,00004	24,83344
	0,000855	0,050704	6,486456	48,61907	7632	5000000	0,346269	-2,41939	2,416168	-29,3214	2,85586	-19,8975	1971	27,32582	4,439018	12,43248	7632	1,00E-06	24,7863
	-0,00112	0,031477	6,387731	44,5476	4860	5000000	0,322256	-2,37173	2,486594	-29,2782	2,807965	-17,5284	9756	27,29643	4,455583	28,05505	5138	0,00004	24,75361
	0,001098	0,029602	6,551706	44,41424	9433	5000000	0,354655	-2,42715	2,424679	-29,2922	2,898031	-25,6095	6258	27,31709	4,451324	14,30359	5501	1,00E-06	24,76226
	-0,0015	0,026083	6,448915	51,02916	4399	5000000	0,33973	-2,44076	2,478318	-29,1724	2,878764	-29,1846	1789	27,29146	4,43915	13,47288	8867	1,00E-06	24,78604
	-0,00037	-0,00362	6,560207	48,21073	6388	5000000	0,344089	-2,4362	2,447767	-29,2348	2,854755	-23,7018	8861	27,22577	4,510981	30,40327	9305	0,00008	24,6461
	-0,00407	0,04407	6,398269	41,66483	1646	5000000	0,332425	-2,43952	2,477391	-29,1762	2,873851	-20,6517	6824	27,28744	4,441024	27,49261	5138	0,00002	24,78221
	-0,00067	0,030029	6,398129	49,55854	2876	5000000	0,336812	-2,4486	2,472728	-29,1686	2,87549	-21,6657	7034	27,25291	4,450551	26,28582	4488	0,00006	24,76359
	0,000574	0,053609	6,353372	49,5111	4337	5000000	0,305866	-2,40924	2,480753	-29,2232	2,88505	-19,7202	7311	27,30092	4,442467	24,34016	5567	0,00002	24,77939
125	-0,00017	0,018337	6,374744	44,72567	8268	5000000	0,333214	-2,42167	2,473649	-29,2142	2,908558	-20,9756	1076	27,2801	4,459352	26,70826	2007	0,00002	24,74643
Průměr														27,28693	4,455636			3,18E-05	24,75378

## 32QAM

	-0,0072	-0,00682	7,990298	52,7076	5573	5000000	0,41638	-2,69236	2,982557	-27,9198	3,296191	22,48414	3544	25,87248	5,254575	27,8578	8920	0,00014	23,32129
	0,003561	-0,07117	8,105014	52,26614	3651	5000000	0,418646	-2,65607	3,002575	-27,9398	4,032252	40,55953	5518	25,01885	6,195927	50,31114	5534	0,003328	21,88957
	-0,00457	0,065059	7,89022	53,2359	8552	5000000	0,416636	-2,68907	2,965358	-27,9522	3,254664	21,66942	1743	25,89525	5,24821	32,75375	9560	0,000301	23,33027
	-0,00308	0,005895	7,816071	48,58418	5046	5000000	0,403078	-2,71101	3,016835	-27,8381	3,244756	-22,9836	5921	25,9162	5,196228	29,21225	8629	0,00016	23,41828
	-0,00206	0,039139	8,008879	50,59927	6272	5000000	0,432985	-2,65251	3,013556	-27,9271	3,278155	-24,4699	7597	25,86826	5,276052	29,99172	9303	0,000441	23,28344
	0,00288	0,030268	7,74815	48,20181	604	5000000	0,374867	-2,795	2,979065	-27,7763	3,344057	-22,7625	9299	25,85301	5,216328	34,13183	2244	0,000461	23,38336
	0,000638	-0,00019	7,864283	57,10985	6125	5000000	0,3857	-2,81104	2,982063	-27,7483	3,259247	-24,1678	6927	25,88052	5,174809	31,34758	5424	0,0001	23,45364
	0,008468	0,006105	7,629	54,2675	3584	5000000	0,374208	-2,73737	3,10604	-27,6597	3,379409	-24,0343	8402	25,79415	5,236198	33,61611	9619	0,000541	23,35258
	0,000106	0,03102	7,993481	57,7239	3775	5000000	0,422896	-2,74071	3,012757	-27,802	3,263488	-29,1429	6043	25,84218	5,245493	28,79176	8286	0,000281	23,33597
	-0,00574	0,029653	7,774676	52,92414	867	5000000	0,391513	-2,77914	3,017308	-27,7397	3,431875	-23,7177	3267	25,80556	5,261668	29,59174	1478	0,000281	23,30802
	0,000684	-0,00366	7,896684	54,65754	5142	5000000	0,39771	-2,73567	3,036672	-27,7715	3,341522	-23,5053	1789	25,85131	5,208563	31,59248	1194	0,000241	23,39613
150	-0,00525	0,007381	8,158573	62,41108	1411	5000000	0,427982	-2,66718	2,996003	-27,9345	3,233755	-25,1479	4071	25,90805	5,226473	28,01452	4080	0,00012	23,367
Průměr														25,79215	5,31171			0,000533	23,23663

Vzdálenos t (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)	
0	0,000735	-0,0029	5,519719	33,8366	2404	6000000	0,546974	-0,94149	1,340272	-35,7142	2,002261	-17,3283	3795	29,37799	3,098198	15,22802	9488	0,00015	26,53794
	-0,00117	0,024713	5,573702	37,30704	2562	6000000	0,535238	-0,95192	1,346359	-35,6562	1,978421	-19,8088	6354	29,41276	3,079618	13,45997	4940	0,000167	26,58994
	-0,00121	0,014553	5,665876	34,79487	4053	6000000	0,535575	-0,95584	1,319054	-35,7617	2,029728	-15,8139	6768	29,40607	3,095834	14,16641	2657	0,000134	26,54488
	0,001234	0,008825	5,602234	38,1675	6493	6000000	0,509289	-0,92843	1,348887	-35,7163	2,064984	-14,9981	4316	29,42454	3,09307	16,39876	6357	0,000217	26,5515
	0,0011	-0,01452	5,595153	38,36198	1268	6000000	0,55103	-0,96059	1,33114	-35,695	2,028388	15,04367	4050	29,44151	3,077363	16,21884	125	0,000117	26,59712
	-0,00118	0,016504	5,573807	45,66003	601	6000000	0,54884	-0,94985	1,337719	-35,6997	2,056501	-15,5769	7740	29,44969	3,073718	14,34756	6359	0,000184	26,60635
	0,000085	0,018021	5,466412	41,90193	360	6000000	0,509891	-0,91737	1,364597	-35,6804	2,005721	-15,5201	7300	29,55501	3,011118	13,84913	6731	0,0001	26,7863
	0,000601	0,009061	5,480113	32,27388	259	6000000	0,488997	-0,92752	1,351619	-35,707	2,068205	-19,8155	2126	29,48078	3,052138	18,11013	2829	0,000134	26,66886
	-0,00341	0,00918	5,522602	36,50801	7026	6000000	0,538187	-0,92889	1,355083	-35,6878	2,045257	-16,3266	8659	29,33969	3,119683	15,10133	8429	0,000217	26,47693
	0,000637	0,006328	5,521939	35,63138	7062	6000000	0,549181	-0,94233	1,308978	-35,8479	2,030452	-15,559	7617	29,43348	3,096533	17,31336	6357	0,000267	26,54105
Průměr													29,43215	3,079727			0,000169	26,59008	
25	-0,00416	0,002685	6,237368	40,76573	1574	6000000	0,620466	-0,99165	1,412071	-35,2618	1,912207	-17,8612	4596	29,16858	3,148797	18,33836	6357	0,000067	26,39862
	-0,00186	0,005285	6,19165	42,47125	561	6000000	0,67046	-0,98979	1,403811	-35,3012	1,941	18,30372	8155	29,16377	3,155063	15,00929	7608	0,0001	26,3807
	0,003809	0,022039	6,164467	46,81745	5340	6000000	0,627579	-0,97099	1,406535	-35,3444	1,944801	-17,7822	5476	29,15234	3,162219	15,94919	7607	0,0001	26,36102
	0,001604	-0,02739	5,992732	38,86018	4943	6000000	0,641029	-0,97075	1,404339	-35,3543	2,000675	-16,0382	8406	29,15149	3,168923	14,56291	818	0,0001	26,34262
	0,002039	0,006831	5,956717	34,49848	5923	6000000	0,650108	-0,97989	1,383987	-35,4127	2,04373	-17,8206	2990	29,10337	3,202319	18,05413	6359	0,000184	26,25033
	-0,0031	0,035051	5,944699	31,64712	19	6000000	0,642392	-1,00617	1,410688	-35,2253	1,942572	-15,3284	5250	29,14629	3,152679	14,97551	1435	0,000134	26,38677
	0,001347	0,036934	5,988621	33,79213	3516	6000000	0,641094	-0,98159	1,399313	-35,3438	2,036329	-19,8157	3383	29,09801	3,205675	19,67072	9310	0,000184	26,24189
	0,002334	0,017419	6,012618	34,89634	9866	6000000	0,636174	-0,96143	1,39783	-35,4087	1,998055	-16,8012	8602	29,15604	3,177363	16,56308	6357	0,000117	26,31944
	0,001485	0,017093	5,963151	34,93604	8765	6000000	0,633732	-0,99302	1,403699	-35,2923	1,981624	-15,1815	6184	29,16304	3,161317	15,26202	3355	0,00005	26,36423
	-0,00072	0,01686	5,96051	36,77447	7205	6000000	0,616436	-0,99006	1,381892	-35,3913	2,002654	-14,5989	5127	29,12996	3,189289	15,49808	3467	0,000117	26,28673
-0,00078	0,006247	5,908499	39,14878	2673	6000000	0,645588	-1,00731	1,409436	-35,2271	1,989543	-16,3803	7175	29,15386	3,151111	16,48668	2101	0,000067	26,39207	
0,003275	0,019721	5,887818	38,09277	7	6000000	0,625227	-0,97144	1,401612	-35,3637	2,008152	-15,0798	2596	29,13353	3,178432	17,16126	2329	0,000134	26,31611	
-0,00247	-0,01263	5,691177	37,55113	3732	6000000	0,627192	-0,9837	1,415257	-35,2715	2,082903	-19,4869	3390	29,10603	3,184228	15,23122	4940	0,00005	26,30151	
-0,00065	0,005893	5,737557	36,0699	7136	6000000	0,622811	-0,97161	1,361993	-35,5299	2,06585	-18,1996	1394	29,17242	3,179093	16,15452	3149	0,00015	26,31405	
-0,00088	-0,04745	5,787239	40,30422	1026	6000000	0,636283	-0,9738	1,395586	-35,3821	2,036581	-21,1789	6180	29,1613	3,16894	16,62992	4940	0,0001	26,34258	
-0,00042	0,018268	5,873915	41,44392	7428	6000000	0,623988	-0,96774	1,390665	-35,4205	2,044543	-17,123	3882	29,15956	3,177118	16,64346	6359	0,000067	26,32068	
0,003547	0,034177	5,792024	38,80866	9851	6000000	0,624211	-0,95471	1,404928	-35,3981	1,979218	-15,9519	4697	29,19349	3,151469	14,05548	369	0,000033	26,39158	
-0,00147	0,006948	5,70049	39,40029	7791	6000000	0,620684	-0,99784	1,392086	-35,326	2,077203	-17,2661	1522	29,12823	3,179716	15,77313	6359	0,000184	26,31202	
0,000281	-0,00415	5,929106	42,62195	8238	6000000	0,597636	-0,97134	1,400987	-35,3666	2,021666	-14,7692	5843	29,14049	3,171872	15,44808	818	0,0001	26,33454	
Průměr													29,14641	3,171875			0,000107	26,33461	
25	0,003937	0,017079	5,280153	34,54548	7007	6000000	0,503102	-1,15111	1,44771	-34,6586	2,031896	-19,6272	9733	29,37658	2,953611	18,16401	7870	0,00015	26,9533
	0,001641	0,036879	5,404664	36,59119	5524	6000000	0,54354	-1,15873	1,477182	-34,5287	2,024058	-19,7971	3704	29,32484	2,961892	15,16846	6359	0,000067	26,92996
	-0,00212	0,01162	5,340929	38,28702	610	6000000	0,527801	-1,13683	1,460464	-34,653	2,002821	-16,6131	1248	29,35561	2,961894	14,21326	3169	0,0001	26,92947
	0,003053	0,015595	5,443877	41,69481	4205	6000000	0,543235	-1,1545	1,442696	-34,6671	1,999658	-16,2787	8475	29,30845	2,986131	14,36317	6083	0,000067	26,85967
	0,000596	0,019498	5,355952	40,97319	2105	6000000	0,52201	-1,15671	1,42637	-34,7205	2,014443	20,34975	7649	29,31843	2,992577	17,84378	1518	0,000184	26,83888

## 64QAM

50	0,000856	0,043549	5,340927	36,69965	6181	6000000	0,523929	-1,13874	1,440906	-34,7199	1,947689	-17,3503	4685	29,4	2,952058	15,57028	6419	0,000084	26,95861
	0,004031	0,016249	5,468045	37,32235	5588	6000000	0,543784	-1,14918	1,460445	-34,6174	1,954133	-15,1964	3608	29,32772	2,97471	16,78876	960	0,000134	26,89163
	-0,00022	0,004401	5,301363	35,26672	2731	6000000	0,519945	-1,16405	1,466713	-34,5516	2,005816	-21,1504	6423	29,29728	2,977421	17,16075	6419	0,000084	26,8843
	0,002941	0,015686	5,438736	33,3653	6269	6000000	0,553848	-1,14724	1,465	-34,6062	2,00314	-19,0794	8910	29,29831	2,987608	17,0154	6359	0,000067	26,85488
	0,001266	0,009398	5,369178	38,95382	2673	6000000	0,536801	-1,1634	1,465919	-34,5563	2,021216	-25,5791	4150	29,35402	2,957469	16,59105	3875	0,00005	26,94327
	0,000735	0,031578	5,384702	38,44517	1667	6000000	0,551906	-1,15901	1,467038	-34,5649	1,991176	-19,5268	8910	29,31147	2,963888	14,55322	221	0,000117	26,92337
	0,001984	0,016961	5,420766	37,38545	6065	6000000	0,5514	-1,15783	1,452759	-34,6204	1,983403	-17,3083	5530	29,25704	3,012877	15,9343	3875	0,00015	26,78049
	0,000654	0,00816	5,372606	34,47033	5702	6000000	0,540158	-1,13256	1,48396	-34,5782	1,950331	20,1607	4219	29,32238	2,968434	15,19785	1518	0,000117	26,91006
	0,002557	0,030451	5,395566	35,36734	561	6000000	0,554244	-1,15194	1,456464	-34,624	1,951919	-17,4353	1691	29,25227	3,015538	16,61509	1518	0,000184	26,77233
	-0,00102	0,026522	5,420374	35,37188	9494	6000000	0,555523	-1,14224	1,454714	-34,6586	2,003883	-19,1967	4907	29,24953	3,009076	16,55691	6359	0,000117	26,79195
	0,00262	-0,00517	5,416708	39,31368	978	6000000	0,561369	-1,15399	1,473816	-34,5546	1,953687	-14,2554	1574	29,25629	3,003724	15,92631	5696	0,00005	26,80872
	Průměr												29,31314		2,979932			0,000108	26,87693

75	0,002594	0,029757	6,324598	41,48333	4119	6000000	0,651067	-1,23638	1,64866	-33,7195	2,211164	-22,8756	4943	28,26824	3,388689	17,06648	4940	0,000518	25,75431
	0,000659	0,029878	6,498962	49,35459	8475	6000000	0,656756	-1,24584	1,638462	-33,7297	2,180852	-23,0413	9123	28,26504	3,384062	17,34593	961	0,000234	25,77094
	0,004181	0,034173	6,277331	49,66389	1268	6000000	0,656134	-1,26935	1,66234	-33,5906	2,238885	-22,0387	5476	28,26287	3,356589	16,61829	5252	0,000351	25,84019
	-0,0002	0,01689	6,34655	42,95046	148	6000000	0,649955	-1,23995	1,641079	-33,736	2,192993	23,09291	1270	28,26851	3,381157	21,02623	1270	0,000367	25,77725
	-0,00379	0,037862	6,225433	44,93815	9137	6000000	0,66217	-1,24799	1,620116	-33,7859	2,577953	-35,6159	7701	27,75474	3,69772	43,11387	7723	0,00127	24,9966
	-0,00028	0,018905	6,425492	43,019	9236	6000000	0,667646	-1,25354	1,65188	-33,6652	2,278924	29,14603	14	28,09493	3,469134	26,5019	606	0,000501	25,55447
	0,00301	-0,00412	6,306126	49,15466	2296	6000000	0,665955	-1,24698	1,611198	-33,8186	2,263419	-19,776	9309	28,2211	3,421804	18,29304	8870	0,000501	25,67067
	0,000138	0,014279	6,374159	44,00848	5198	6000000	0,651283	-1,25332	1,643331	-33,6943	2,204561	-26,97	1519	28,28604	3,370083	18,07875	5085	0,000401	25,80427
	0,000399	0,017653	6,323743	44,03771	8604	6000000	0,659766	-1,26023	1,625639	-33,7357	2,124173	18,88807	3021	28,33679	3,341983	16,75891	3016	0,000284	25,87847
	0,000689	0,019743	6,377693	40,46448	18	6000000	0,648558	-1,24338	1,625929	-33,7782	2,231091	15,71422	7918	28,25106	3,402386	16,6668	500	0,000535	25,71895
	0,001169	0,04237	6,304791	41,75135	5278	6000000	0,637809	-1,24097	1,648252	-33,7092	2,23111	22,81324	9901	28,2379	3,399747	18,648	500	0,000468	25,72676
	0,006111	0,003322	6,296992	41,89415	8096	6000000	0,650927	-1,27906	1,601781	-33,7657	2,302593	-30,6387	118	28,15479	3,461478	26,32539	118	0,000685	25,57087
	-2,3E-05	0,02208	6,373475	40,41552	2076	6000000	0,669344	-1,21895	1,632112	-33,8199	2,168267	19,16035	6669	28,30333	3,380976	17,86368	6177	0,000384	25,7769
	-0,00035	0,018311	6,290883	54,58613	2127	6000000	0,660439	-1,25539	1,64974	-33,6677	2,169889	-18,2554	1865	28,27316	3,3707	19,25967	15	0,000418	25,80178
0,004127	-0,04125	6,315389	42,95342	5013	6000000	0,654983	-1,23199	1,595682	-33,9105	2,778337	39,59526	5233	27,53363	3,834311	43,51643	5218	0,001721	24,68021	
0,002637	0,009447	6,348195	45,66865	6641	6000000	0,662408	-1,25795	1,623368	-33,7492	2,210747	18,01588	3359	28,2438	3,402377	16,53012	8102	0,000451	25,72069	
Průměr													28,17225	3,44145			0,000568	25,62771	

-0,00017	0,000713	5,818751	47,19691	1248	6000000	0,391204	-1,54866	2,198082	-31,4087	2,914331	22,04188	1479	27,11998	3,576274	22,34906	1488	0,001186	25,28304
-0,00162	0,008969	5,798332	41,07461	7347	6000000	0,388573	-1,54057	2,167813	-31,5041	3,072067	-28,5052	6197	26,96324	3,748913	31,26541	9982	0,001855	24,87421
0,005042	-0,01791	5,959448	43,39209	4697	6000000	0,375512	-1,5571	2,178411	-31,4448	3,234354	29,12304	3563	26,6179	3,940882	30,82744	3563	0,002522	24,44037
0,007675	0,005181	5,881147	41,12337	2653	6000000	0,380022	-1,5694	2,220495	-31,3114	3,032424	-32,0277	6524	27,02146	3,621929	19,21753	2326	0,00147	25,17188
-0,00276	0,07466	5,84651	43,82425	1522	6000000	0,374982	-1,54888	2,172402	-31,4762	3,031868	-30,4801	7791	26,95792	3,718381	27,76901	9648	0,00152	24,94499
0,003396	0,036283	5,860749	-53,5259	7062	6000000	0,35835	-1,56307	2,16706	-31,4634	3,040731	-23,6262	4470	26,86297	3,785601	29,74264	3590	0,001921	24,78798
0,000008	-0,00177	6,111302	-46,5804	4377	6000000	0,397965	-1,51365	2,113828	-31,7009	3,601384	38,42357	4138	26,06587	4,439174	46,17979	4120	0,003842	23,40414
0,002433	0,012314	6,160042	46,21173	6587	6000000	0,413562	-1,54102	2,147769	-31,5567	3,211985	-28,2889	9981	26,69503	3,955858	36,77565	6813	0,002138	24,40898
-0,0019	0,010342	6,099431	44,47356	8096	6000000	0,42697	-1,51804	2,184013	-31,5031	2,909654	24,24923	2889	26,97248	3,708975	26,2018	2886	0,00157	24,96486
0,001209	0,014908	6,010194	41,43118	8048	6000000	0,383003	-1,5234	2,181336	-31,5003	3,09837	24,39029	1515	26,88737	3,77229	30,76983	442	0,001787	24,82079
0,014878	-0,0163	6,05461	47,34801	6181	6000000	0,386479	-1,54498	2,1307	-31,5947	3,477396	41,85139	7651	26,37904	4,170614	41,31149	7621	0,003074	23,94421

## 64QAM

100 Průměr	-0,0035	0,01407	5,788344	47,77315	4615	6000000	0,399627	-1,52981	2,205247	-31,4246	2,966414	28,66657	6524	27,05911	3,660416	29,80221	9980	0,00147	25,08081
	0,008633	0,005831	5,981169	45,76004	2990	6000000	0,426361	-1,53946	2,167189	-31,5079	2,909732	-29,6799	5825	27,09323	3,622034	20,92099	2436	0,001403	25,17105
														26,82274	3,824719			0,001981	24,71518
	0,009451	0,04016	7,578912	55,03514	1822	6000000	0,463107	-2,01927	2,013732	-30,8977	4,715626	67,91541	1029	24,22378	5,644163	39,4908	1020	0,009342	21,30039
	-0,01051	0,068961	7,486279	-58,7162	1675	6000000	0,519137	-2,01416	2,131445	-30,6551	5,010141	75,24101	1793	23,81011	5,979624	56,80594	1788	0,009338	20,79693
	0,005428	0,104158	7,181362	59,71719	6184	6000000	0,450542	-2,03798	2,111307	-30,6495	4,204815	-37,1722	4990	24,7564	5,160561	45,34988	4990	0,006581	22,08158
	-0,00402	0,030549	7,104046	53,20931	8330	6000000	0,455648	-2,10809	2,080112	-30,5696	4,13692	-40,3738	8759	24,90765	5,011361	27,98928	944	0,006414	22,33005
	-0,02893	0,245298	7,347229	54,19738	8950	6000000	0,457811	-2,09161	2,054028	-30,6581	4,793362	42,88112	322	24,15983	5,680189	42,72937	328	0,009638	21,24207
	0,002584	0,014763	7,346357	75,55352	5292	6000000	0,427637	-1,98042	2,067443	-30,8638	4,564377	49,76278	8977	24,33418	5,5702	38,5021	7392	0,009705	21,40795
	0,002076	-0,0309	7,185782	58,60588	4685	6000000	0,467894	-2,08057	2,105218	-30,5746	4,089732	-30,505	563	24,99719	4,953409	32,6215	2395	0,006016	22,43711
	0,002544	0,031192	7,238919	54,80064	6953	6000000	0,455259	-2,0992	2,120753	-30,504	4,007518	-32,2999	2731	25,07211	4,870852	26,74892	3409	0,005573	22,58111
	0,000486	0,002398	7,130693	60,42421	8226	6000000	0,480497	-2,09236	2,194658	-30,3647	3,898295	-31,0319	3136	25,15222	4,772416	36,6436	3133	0,005195	22,75861
	-0,00197	0,054229	7,283931	73,08897	7102	6000000	0,471459	-2,02789	2,117257	-30,6575	4,41699	-34,76	6142	24,49646	5,377499	40,30546	8074	0,008068	21,71781
	0,003954	-0,20883	7,508712	55,47785	3021	6000000	0,446793	-2,05913	2,083902	-30,6638	5,04335	57,28932	8695	23,80248	6,003245	46,13141	5197	0,010824	20,75921
	0,009516	0,070366	7,234258	64,4039	491	6000000	0,465673	-2,00892	2,157066	-30,6105	4,358584	-51,1697	4050	24,7081	5,218105	34,54925	8415	0,007253	21,98502
	0,001811	0,0481	6,994762	51,15586	7010	6000000	0,411421	-2,11334	2,148134	-30,4188	4,217952	33,99293	995	24,86655	5,012274	40,14074	988	0,006006	22,33689
	0,001318	-0,06238	7,114568	53,90532	3859	6000000	0,435591	-2,09766	2,198036	-30,3473	4,370332	38,18191	5225	24,56017	5,270256	42,60486	5215	0,007099	21,89798
	-0,00506	0,048763	7,20537	90,51425	3990	6000000	0,441515	-2,05578	2,169317	-30,4904	4,788819	46,0661	1493	24,08328	5,71829	42,61597	3999	0,009555	21,18343
	0,000502	0,060971	7,310182	74,52845	2533	6000000	0,479977	-2,01884	2,135079	-30,6377	4,283163	-35,9201	17	24,6872	5,199295	32,86409	9463	0,0075	22,00581
	0,00776	-0,01408	7,114536	54,39015	3704	6000000	0,404482	-2,08913	2,180744	-30,4	3,908406	-32,0396	5476	25,1494	4,772765	27,57761	5249	0,005178	22,75913
125 Průměr														24,57454	5,306736			0,007605	21,85771

Vzdálenos t (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)	
0	0,005074	0,01473	5,736937	49,67922	9418	7000000	0,519475	-0,92672	1,252489	-36,1483	2,288373	-18,8327	8674	28,49596	3,479978	21,54775	2929	0,004091	26,03364
	0,006854	-0,04057	5,65335	47,64028	3813	7000000	0,487249	-0,90634	1,234578	-36,2974	2,484228	-25,8595	411	28,21654	3,635947	33,45134	412	0,004596	25,65189
	0,005028	0,015569	5,665723	46,26987	8092	7000000	0,495515	-0,90682	1,286213	-36,0613	2,154877	-17,7976	9151	28,82882	3,311884	19,67594	2942	0,002763	26,46712
	0,00039	0,008875	5,574499	45,68898	582	7000000	0,483369	-0,92717	1,296968	-35,9486	2,125409	17,47524	6823	28,90024	3,268726	20,41358	3560	0,002462	26,58033
	-0,00539	-0,01023	5,153147	36,65618	3588	7000000	0,427386	-0,92091	1,322897	-35,8534	2,07879	19,22305	3977	29,36007	3,035199	14,3362	1277	0,001204	27,23185
	0,000078	-0,01827	5,290165	40,23924	6370	7000000	0,458469	-0,891	1,298764	-36,0543	2,20018	-21,8272	9439	29,11379	3,177983	19,35784	8466	0,002305	26,82555
	-0,00227	-0,00155	5,430977	47,25193	1674	7000000	0,475299	-0,93963	1,28036	-35,9822	2,205792	22,05388	292	28,87921	3,271822	21,37309	2936	0,002477	26,57619
	-0,00267	0,020214	5,4655	58,4548	1297	7000000	0,460818	-0,92609	1,29583	-35,9571	2,127843	-17,329	8718	29,0074	3,209465	15,18892	44	0,002069	26,74039
	-0,00108	0,012625	5,397168	42,66071	3813	7000000	0,477315	-0,91349	1,29569	-35,9976	2,166779	-18,8194	9080	29,04054	3,197813	14,91044	44	0,002348	26,77118
	0,002948	0,01226	5,466377	40,8514	2261	7000000	0,457841	-0,92262	1,31413	-35,8869	2,27602	-19,5408	2204	28,90518	3,263445	23,13218	4403	0,002248	26,59795
Průměr													28,87477	3,285226			0,002656	26,54761	
25	-0,00388	0,024974	5,799345	50,5179	9	7000000	0,543703	-0,95407	1,261624	-36,0172	2,277171	-19,6888	5726	28,43245	3,494086	21,52765	4413	0,003493	25,99989
	-0,00646	0,015023	5,863243	51,14588	5293	7000000	0,547733	-0,96552	1,335755	-35,66	2,133974	-25,9987	5946	28,53158	3,398915	15,93875	4271	0,002906	26,24131
	-0,0007	0,005085	5,800849	47,25588	5058	7000000	0,577214	-0,91814	1,314008	-35,9013	2,242045	-19,491	5530	28,4277	3,480232	21,81525	2929	0,003092	26,03279
	0,000735	0,012811	5,835636	47,18471	8854	7000000	0,558546	-0,92148	1,324622	-35,844	2,158027	17,92202	2029	28,63679	3,370655	15,58641	4274	0,00262	26,31345
	0,000519	-0,09561	5,611484	47,6967	943	7000000	0,54346	-0,96287	1,286047	-35,8821	2,626296	-24,9381	9485	27,76742	3,846867	29,39731	9503	0,005245	25,15881
	0,003768	-0,02782	5,633553	54,95092	395	7000000	0,580262	-0,94512	1,328426	-35,7545	2,284977	-26,8823	8473	28,49323	3,430757	20,94689	8466	0,00272	26,15825
	-0,00128	-0,0183	5,644274	42,30802	4265	7000000	0,541483	-0,95068	1,281136	-35,943	2,351521	17,64445	8653	28,34524	3,533845	20,08896	8638	0,004267	25,89533
	-0,00318	0,009518	5,597402	40,11697	9350	7000000	0,542517	-0,9501	1,306985	-35,8321	2,316614	-19,5201	9543	28,41135	3,482529	21,69728	6520	0,003722	26,02458
	0,004562	0,006869	5,70386	43,74618	1653	7000000	0,567121	-0,9494	1,304472	-35,8452	2,218611	-21,5332	8991	28,57718	3,403451	15,7879	44	0,002529	26,22438
	-0,0014	0,001624	5,626926	59,96526	4516	7000000	0,568367	-0,92928	1,274534	-36,0415	2,307463	-25,8918	3618	28,41574	3,498685	20,5341	5439	0,003694	25,98362
0,001014	-0,00393	5,611568	42,4693	6115	7000000	0,537658	-0,92466	1,309061	-35,903	2,327852	-20,3829	7811	28,32601	3,530592	19,54422	6520	0,003429	25,90658	
-0,00323	-0,02446	5,612409	44,75598	6686	7000000	0,5493	-0,93812	1,303164	-35,8866	2,305938	-22,0007	8674	28,31928	3,543192	22,08443	8466	0,003845	25,87635	
-0,00501	-0,01352	5,668982	45,14781	7371	7000000	0,550018	-0,9528	1,294061	-35,8797	2,263604	-25,0696	8853	28,43892	3,469709	18,3196	9138	0,003851	26,05425	
0,000964	0,00267	5,633939	49,70674	8092	7000000	0,554006	-0,9596	1,29776	-35,8419	2,371266	-22,4724	1483	28,24658	3,57531	21,1941	1499	0,003804	25,79662	
Průměr													28,38353	3,504202			0,003516	25,97616	
25	0,003633	-0,00754	5,706814	55,43443	5608	7000000	0,531304	-1,07801	1,374204	-35,1562	2,225616	-18,5802	2962	28,4851	3,376544	22,51965	2954	0,003551	26,29618
	-0,00146	-0,01453	5,667214	42,5886	3946	7000000	0,536584	-1,05621	1,345777	-35,3362	2,073895	-22,4085	9439	28,64801	3,311521	17,15259	2334	0,003107	26,46167
	-0,00396	0,049897	5,759084	49,40298	3813	7000000	0,556355	-1,1121	1,361855	-35,0984	2,305532	24,37276	515	28,18596	3,513128	33,3148	517	0,003994	25,95457
	0,001804	0,002098	5,60979	46,97948	7551	7000000	0,530206	-1,10019	1,364199	-35,1266	2,144018	-19,3492	2029	28,54525	3,338338	21,70224	2936	0,003013	26,39528
	0,001664	0,01898	5,655404	46,01004	3611	7000000	0,517299	-1,08417	1,337994	-35,2788	2,111334	18,66802	937	28,63694	3,308276	19,66471	4271	0,003236	26,47364
	-0,00034	-0,04743	5,745996	50,309	9153	7000000	0,540612	-1,08913	1,313879	-35,3574	2,305913	-17,717	2325	28,25117	3,522667	22,30841	9218	0,004667	25,9223
	0,006664	0,050485	5,846822	44,82152	3813	7000000	0,574843	-1,01922	1,292419	-35,6717	3,14948	-37,8805	2910	26,82035	4,364699	43,54295	2877	0,008848	24,0582
	0,00542	0,034359	5,727286	47,63364	2027	7000000	0,525285	-1,09994	1,392523	-35,0183	2,471135	32,80816	9171	28,03617	3,596708	30,8886	768	0,004706	25,74517
	-0,00454	0,078923	5,776062	51,79481	1742	7000000	0,534667	-1,09666	1,350117	-35,1921	2,461714	-25,4315	3691	27,98998	3,642963	34,91516	517	0,005063	25,63494
	-0,00317	-0,00089	5,659805	53,83833	541	7000000	0,526915	-1,08778	1,34789	-35,2287	2,229913	-22,8118	2301	28,3524	3,454396	21,42701	8435	0,004362	26,09663
-0,00014	0,007885	5,921479	49,16902	1426	7000000	0,58025	-1,09759	1,349269	-35,1924	2,146609	24,26179	6384	28,51587	3,349464	19,64856	771	0,002867	26,36533	
-0,00098	-0,02038	5,68896	48,76385	5608	7000000	0,549215	-1,08591	1,370242	-35,1474	2,107845	-25,1106	4622	28,57095	3,320795	19,53576	9066	0,00272	26,44138	

128QAM

50	0,00606	-0,02441	5,670119	48,60478	835	7000000	0,549239	-1,08272	1,362868	-35,186	2,307709	-22,8489	419	28,13802	3,562105	31,62997	6087	0,004667	25,82914
Průměr														28,24432	3,512431			0,004215	25,97496
	0,00578	-0,03948	6,432197	51,85823	9713	7000000	0,572376	-1,14332	1,443807	-34,6957	2,82042	-29,2298	2027	27,15683	4,048489	31,5862	768	0,008275	24,71071
	-0,00126	0,013091	6,360341	54,67434	9804	7000000	0,526034	-1,14999	1,476592	-34,5559	2,454301	-20,3257	4786	27,5777	3,794331	22,75479	4403	0,006256	25,27509
	-0,00801	0,083196	6,416571	59,87643	5883	7000000	0,608538	-1,16901	1,456055	-34,5759	3,371153	-40,2628	6483	26,12293	4,668429	46,29158	6473	0,010182	23,47122
	0,00829	0,085632	6,445647	48,863	3539	7000000	0,567536	-1,16777	1,430244	-34,6734	2,795187	29,1921	9171	27,06378	4,100673	31,54575	517	0,008476	24,6001
	0,002809	0,034965	6,69443	63,07946	6353	7000000	0,619051	-1,12325	1,430166	-34,8056	2,659103	-25,2871	2930	27,24187	4,005659	28,10565	2931	0,00809	24,80233
	0,001346	-0,02411	6,707844	51,74419	8462	7000000	0,587431	-1,13698	1,463975	-34,6395	2,457573	21,06042	1281	27,56378	3,792267	20,61516	1273	0,006171	25,27838
	0,001604	-0,04759	6,468618	44,91909	8853	7000000	0,58132	-1,13181	1,474377	-34,6158	2,673146	31,99151	6591	27,2935	3,95517	22,50858	5448	0,00722	24,91483
	0,001986	-0,02725	6,436624	48,48547	1426	7000000	0,571724	-1,18313	1,488723	-34,4176	2,429048	-20,6606	1801	27,59527	3,760753	17,6464	6679	0,005999	25,3493
	-0,00619	-0,00682	6,411453	49,59733	9827	7000000	0,591222	-1,16371	1,459359	-34,5793	2,94364	-30,1528	9646	26,96581	4,153449	31,13091	2495	0,008576	24,49354
	0,014236	-0,01325	6,402719	49,04029	4516	7000000	0,604768	-1,11664	1,430645	-34,8232	2,849603	-29,1687	745	26,95656	4,187678	32,5092	4087	0,009234	24,41289
	-0,01176	-0,0687	6,580758	62,92977	8092	7000000	0,599118	-1,14383	1,430584	-34,7432	3,141144	-32,0623	9270	26,53953	4,429879	43,27175	9273	0,010509	23,92591
	0,013713	-0,14276	6,437398	51,42727	4017	7000000	0,605667	-1,07817	1,467968	-34,7921	2,996404	-38,4032	389	26,68259	4,339731	37,9105	375	0,009521	24,10546
75	-0,00193	-0,03078	6,40269	57,21089	516	7000000	0,574065	-1,15493	1,465565	-34,582	2,41231	-23,5847	538	27,61399	3,751959	19,42422	9824	0,006013	25,37061
Průměr														27,1057	4,076036			0,00804	24,67003
	-0,02501	0,034911	6,157804	65,45362	9437	7000000	0,267614	-1,2918	1,727477	-33,3227	4,619353	-61,3712	6348	24,48191	5,709051	45,66184	7764	0,02242	21,7204
	0,004361	-0,03646	6,15616	67,96231	6041	7000000	0,33039	-1,31441	1,720508	-33,2903	3,953154	33,12587	1739	25,42636	4,988879	33,95454	2041	0,01875	22,89542
	-0,00068	-0,0512	6,244225	59,23772	1952	7000000	0,312844	-1,23509	1,734404	-33,4356	4,2229	-32,5583	8501	25,03347	5,302794	33,87742	9453	0,020971	22,35647
	-0,01053	0,043691	6,136581	56,58442	2650	7000000	0,322987	-1,28784	1,704409	-33,407	4,016874	-33,2818	9211	25,41748	5,026003	30,75201	7932	0,019127	22,82435
	-0,01949	-0,12358	6,354444	61,24156	19	7000000	0,299297	-1,34581	1,703013	-33,2685	5,110887	87,29503	4035	23,99482	6,134115	76,27382	4030	0,023165	21,09812
	0,068661	-0,57583	6,417395	73,70268	5912	7000000	0,257519	-1,22196	1,70862	-33,5531	5,891796	-71,4852	541	22,83677	7,101233	62,71937	525	0,029643	19,82018
100	0,024637	-0,12742	6,237618	62,26688	9	7000000	0,325389	-1,31356	1,768366	-33,1403	4,473977	-30,273	164	24,54677	5,618989	40,33591	162	0,021575	21,85213
Průměr														24,53394	5,697295			0,022236	21,79529

## 256QAM

Vzdálenos t (cm)	frequency offset	frequency drift	Magnitude error			Bit rate	IQ gain imbalance	DC offset measurement			Phase error			Eb/NO	EVM			BER	MER
			RMS	Peak	peak symbol index			I	Q	origin offset	RMS	Peak	peak symbol index		RMS	Peak	peak symbol index		
	(Hz)	(Hz)	(%)	(%)	(-)	(b/s)	(dB)	(%)	(%)	(dB)	(%)	(%)	(-)	dB	(%)	(%)	(-)	(-)	(dB)
	-0,00453	0,019759	5,561532	56,62187	1415	8000000	0,349024	-0,47917	0,738221	-41,1094	4,569152	-37,1676	7614	24,38085	5,050375	37,10137	7608	0,036656	21,64598
0	-0,00893	0,024501	5,722765	64,40845	1278	8000000	0,405425	-0,4979	0,732152	-41,0571	5,04614	-34,9502	2658	23,58295	5,580312	41,78662	2704	0,040649	20,77596
Průměr														23,9819	5,315344			0,038653	21,21097